

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Майкопский государственный технологический университет»**

# **ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие

Майкоп – 2019

УДК 621.31(07)

ББК 31.2

Э 41

СОСТАВИТЕЛЬ: Старков Н.Н., кандидат технических наук, доцент

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по направлению подготовки бакалавров 21.03.01 Нефтегазовое дело

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Основные характеристики и профилактика кабельных сетей.....	4
1.1. Параметры силовых кабелей.....	4
1.2. Характеристика кабельных сооружений.....	6
1.3. Профилактические мероприятия по повышению надежности кабельных линий.....	15
2. Определение мест повреждения в кабельных сетях.....	17
2.1. Виды и характер повреждений кабельных линий.....	17
2.2. Структура системы поиска мест повреждений.....	18
2.3. Характеристика высокочастотных методов ОМП.....	20
2.4. Характеристика низкочастотных методов ОМП.....	25
3. Прожигание изоляции в месте повреждения.....	29
3.1. Требования к методике и основные этапы процесса прожигания.....	29
3.2. Прожигание изоляции от источника постоянного напряжения.....	32
3.3. Прожигание изоляции на переменном напряжении.....	36
3.4. Режимы приема прожигания.....	42
3.5. Передвижные установки для прожигания изоляции.....	45
4. Импульсные искатели повреждения.....	46
4.1. Характеристика импульсных искателей.....	46
4.2. Зондирующие импульсы.....	47
5. Методы ОМП.....	52
5.1. Характеристика индукционных методов ОМП.....	52
5.2. Индукционные методы ОМП для отключенных от сети кабельных линий.....	52
5.3. Акустические методы ОМП.....	60
6. Ремонт кабельных линий.....	64
6.1. Общие указания по ремонту.....	64
6.2. Ремонт защитных покровов.....	66
6.3. Ремонт металлических оболочек.....	68
6.4. Восстановление бумажной изоляции.....	69
6.5. Ремонт токопроводящих жил.....	69
6.6. Ремонт соединительных муфт.....	69
6.7. Ремонт концевых муфт наружной установки.....	69
6.8. Ремонт концевых заделок.....	70
6.9. Ремонт кабельных линий 0,38...10 кВ.....	71
7. Технология изготовления концевых и соединительных муфт.....	75
7.1. Разделка КОНЦОВ КАБЕЛЕЙ с бумажной изоляцией.....	75
7.2. Разделка кабелей с пластмассовой изоляцией.....	76
7.3. Технология монтажа соединительной свинцовой муфты.....	76
7.4. Технология монтажа заделок КВсл.....	79
7.5. Изготовление концевых муфт из термоусаживаемых материалов.....	80
Литература.....	84

## ВВЕДЕНИЕ

Основа надёжного электроснабжения потребителей электрической энергией – безаварийная работа кабельных линий. Бесперебойное электроснабжение потребителей городских сетей и промышленных предприятий зависит от принятых на стадии проектирования новых, прогрессивных технологических решений и использования современной кабельной арматуры, от качественной прокладки кабелей и строгого выполнения всех требований при эксплуатации кабельных линий.

Несмотря на растущее качество изоляции кабельных линий, нельзя исключать их повреждений. Более того, удельное количество повреждений – достаточно устойчивая характеристика определённого класса электрических сетей.

Определение мест повреждения (ОМП) – наиболее сложная, а часто и наиболее длительная технологическая операция по восстановлению повреждённого элемента сети. Это оперативная задача диспетчерских служб электрических сетей.

Затраты средств на ОМП составляют существенную часть эксплуатационных издержек в электросетях. Доля же капитальных затрат на устройства для ОМП в общих капитальных затратах относительно мала. Внедрение прогрессивных методов и средств ОМП даёт значительный экономический эффект. Он складывается из своевременного выявления слабых мест в кабельных линиях, путём проведения профилактических высоковольтных испытаний, сокращения перерывов электроснабжения, уменьшения объёмов ремонтных работ и снижения расходов на земляные работы в летний период времени. Совокупность операций по поиску повреждений и восстановлению работоспособности кабельной линии рассматривается как единая взаимосвязанная система.

## 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРОФИЛАКТИКА КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

### 1.1. Параметры силовых кабелей

Силовые кабели предназначены для передачи электроэнергии, используемой для питания электрических установок. Они имеют одну или несколько изолированных жил, заключённых в металлическую или неметаллическую оболочку, поверх которой в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может быть защитный покров, а в необходимых случаях – броня.

Силовые кабели состоят из токопроводящих жил, изоляции, оболочек и защитных покровов. Помимо этих основных элементов в конструкцию силовых кабелей могут входить экраны, нулевые жилы, жилы защитного заземления и заполнители (рис. 1.1).

Токопроводящие жилы, предназначенные для прохождения электрического тока, бывают основными и нулевыми. Основные жилы применяются для выполнения главной функции кабеля – передачи электроэнергии. Нулевые жилы, предназначенные для протекания разности токов фаз (полюсов) при неравномерной их нагрузке, присоединяются к нейтрали источника тока.

Жилы защитного заземления являются вспомогательными и предназначены для соединения не находящихся под рабочим напряжением металлических частей электроустановки, к которой подключен кабель... с контуром защитного заземления источника тока.

Изоляция служит для обеспечения необходимой электрической прочности токопроводящих жил кабеля по отношению друг к другу и к заземлённой оболочке (земле).

Экраны используются для защиты внешних цепей от влияния электромагнитных полей токов, протекающих по кабелю, и для обеспечения симметрии электрического поля вокруг жил кабеля.

Заполнители предназначены для устранения свободных промежутков между конструктивными элементами кабеля в целях герметизации, придания необходимой формы и механической устойчивости конструкции кабеля.

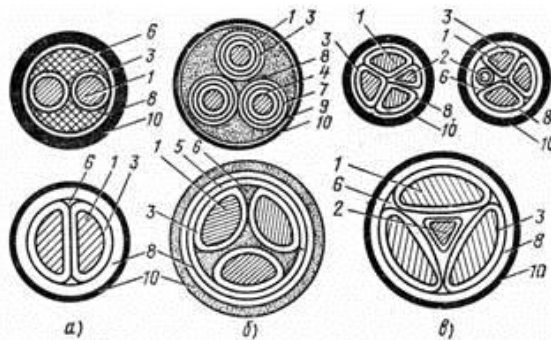


Рис. 1.1. Сечения силовых кабелей: а – двухжильные кабели с круглыми и сегментными жилами; б – трехжильные кабели с поясной изоляцией и с отдельными оболочками; в – четырехжильные кабели с нулевой жилой секторной, круглой и треугольной формы; 1 – токопроводящая жила; 2 – нулевая жила; 3 – изоляция жилы; 4 – экран на токопроводящей жиле; 5 – поясная изоляция; 6 – наполнитель; 7 – экран на изоляции жилы; 8 – оболочка; 9 – бронепокров; 10 – наружный защитный покров

Оболочки защищают внутренние элементы кабеля от увлажнения и других внешних воздействий.

Защитные покровы предназначены для защиты оболочки кабеля от внешних воздействий. В зависимости от конструкции кабеля в защитные покровы входят подушка, бронепокров и наружный покров.

Различным конструкциям кабелей присвоены буквенные индексы. Значения буквенных индексов в обозначении марок кабелей приведены в табл. 1.1.

Силовые кабели с бумажной изоляцией, пропитанной или обедненной, предназначены для эксплуатации в стационарных установках и в земле при температуре окружающей среды от плюс 50 до минус 50 °С и относительной влажности до 98 % при температуре до плюс 35 °С. Изготавливаются они для номинальных напряжений 1, 6 и 10 кВ переменного тока частотой 50 Гц, но могут быть использованы в сетях постоянного тока (рис. 1.2).

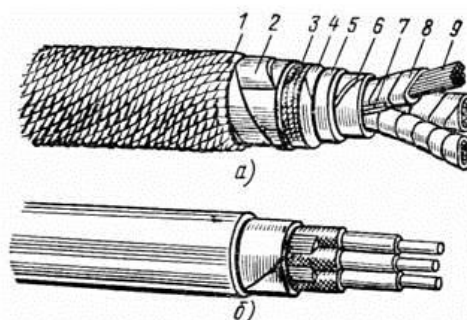


Рис. 1.2. Силовые кабели: а – с бумажной; и б – резиновой изоляцией; 1 – наружный покров; 2 – бронелента; 3 – кабельная пряжа; 4 – кабельная бумага; 5 – оболочка; 6 – поясная изоляция; 7 – наполнитель; 8 – изоляция жилы; 9 – токопроводящая жила

Силовые кабели с бумажной изоляцией, пропитанные нестекающим составом, предназначены для прокладки на вертикальных и наклонных участках трасс без ограничения разности уровней и эксплуатации при температуре окружающей среды от плюс 50 до минус 50 °С и относительной влажности 98 % при температуре до плюс 35 °С и изготавливаются для напряжений 6 и 10 кВ переменного тока частотой 50 Гц, но могут быть использованы и в сетях постоянного тока.

Силовые кабели с пластмассовой изоляцией, в пластмассовой или алюминиевой оболочке с защитными покровами или без них, предназначены для передачи и распространения электроэнергии в стационарных установках на номинальное переменное напряжение 0,66; 1; 3 и 6 кВ частотой 50 Гц.

Кабели могут эксплуатироваться при температуре окружающей среды от минус 50 до плюс 50 °С, относительной влажности воздуха 98 % при температуре плюс 35 °С, в том числе при прокладке на открытом воздухе с защитой от воздействия солнечной радиации.

## Некоторые буквенные символы в обозначении марок кабелей

Элемент конструкции кабеля	Буквенное обозначение	Местонахождение буквы в обозначении марки кабеля	Значение символа
Токопроводящая жила	А - (ож)	Впереди В конце марки в скобках	Алюминиевая Медная Однопроволочные жилы
Изоляция	- В П Пс Пе Пвс Р	- После обозначения жилы То же » » » » » » После обозначения материала оболочки	Бумажная пропитанная Поливинилхлоридная Полиэтиленовая Из самозатухающего полиэтилена Из вулканизированного полиэтилена Из вулканизированного самозатухающего полиэтилена Резиновая
Оболочка	А С В П Р Н Г	После обозначения материала изоляции То же » » » » После обозначения материала жилы То же После обозначения оболочки	Алюминиевая (гладкая) Свинцовая Поливинилхлоридная Полиэтиленовая Резиновая Из найритовой резины Отсутствие брони и защитных покровов
Броня	Б П К Г ББГ	После обозначения оболочки То же » » После обозначения брони В конце марки	Из двух стальных лент Из плоской стальной оцинкованной проволоки То же из круглой Отсутствует наружный покров Из одной профилированной оцинкованной ленты, наложенной «в замок»
Подушка	- б л 2л п в	- После обозначения брони То же » » » » » »	Нормальная Отсутствует Усиленная Особо усиленная С выпрессованным полиэтиленовым шлангом То же с поливинилхлоридным
Наружный покров	н Шп Шв	- После обозначения подушки То же » »	Нормальный Негорючий Из выпрессованного полиэтиленового шланга То же из поливинилхлоридного

*Примечание.* Принадлежность кабеля к контрольному обозначается буквой «К» перед маркой с медными жилами и после буквы «А» – с алюминиевыми.

## 1.2. Характеристика кабельных сооружений

Основным способом канализации электрической энергии на промышленных предприятиях являются кабельные линии. На крупных предприятиях число кабельных линий может достигать до 25 000 при общей длине до 2500 км. Для размещения такого количества кабелей необходимо устройство специальных кабельных сооружений. Наиболее простым и дешевым сооружением является земляная траншея, но так как число повреждений при этом способе составляет около 40 %, то применяется он реже по сравнению с прокладкой в специальных сооружениях.

На предприятиях редко отдают предпочтение какому-либо одному способу прокладки и применяют чаще смешанную прокладку. В качестве сооружений используются:

**1. Земляная траншея.** Глубина траншеи от планировочной отметки для кабелей напряжением до 10 кВ должна быть 0,8 м, при пересечении улиц, площадей – 1,1 м (рис. 1.3).

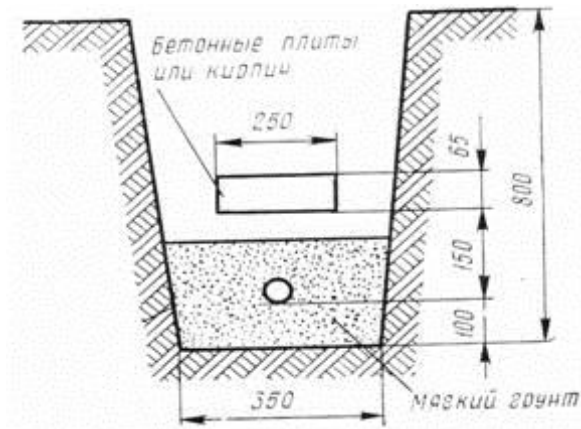


Рис.1.3. Укладка кабеля в траншее

Меньшая глубина траншеи (до 0,6 м) допускается при вводе кабелей в здания, сооружения, а также в местах пересечений с подземными сооружениями при условии защиты кабелей от механических повреждений на участках длиной до 5 м. Ширина траншеи при прокладке в ней силовых кабелей до 10 кВ принимается не менее указанной в табл. 1.2 и на рис. 1.4. Укладывают кабели на подсыпку, а сверху засыпают слоем мелкой земли, не содержащей строительного мусора и шлака. Трассы маркируют опознавательными знаками, закрепляемыми на стенах постоянных зданий и сооружений или на столбиках из угловой стали (пикеты). Знаки размещают на углах и поворотах трассы, в местах установки соединительных муфт, на пересечениях путей сообщения (с обеих сторон), у вводов в здания. На знаках размером 100 x 100 мм указывают знак напряжения (красной краской), обозначение кабельной трассы, расстояние от сооружения (цифрами) и направление к нему (стрелками), № знака (черной краской). Фон знака белый.

Т а б л и ц а 2.2

### Размеры траншей для кабелей до 10 кВ (к рис. 2.4)

Тип траншеи	Размеры, мм			Число прокладываемых силовых кабелей, шт.
	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	
T-1	250	350	2150	1
T-2	300	500	2300	1–2
T-3	400	600	2400	2–3
T-4	600	700	2500	3–4
T-5	750	830	2600	4–5
T-6	900	1000	2800	5–6

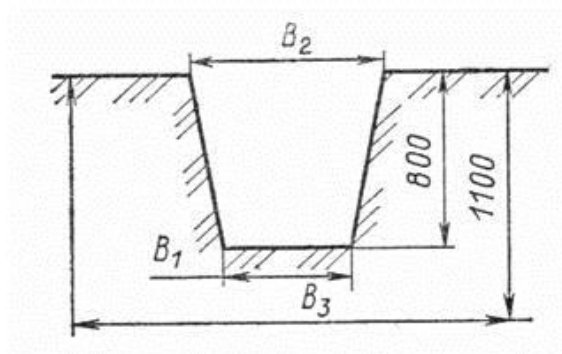


Рис.1.4. Размеры траншеи для прокладки кабелей 1...10 кВ:

B<sub>1</sub> – размер на дне траншеи; B<sub>2</sub> – размер у поверхности земли; B<sub>3</sub> – зона отвода

Примерные образцы опознавательных знаков приведены на рис. 1.5.

**2. Кабельный канал** – это закрытое и заглубленное (частично или полностью) в грунт или пол непроходное сооружение, предназначенное для размещения в нем кабелей, укладку, осмотр и ремонт которых можно производить лишь при снятом перекрытии.

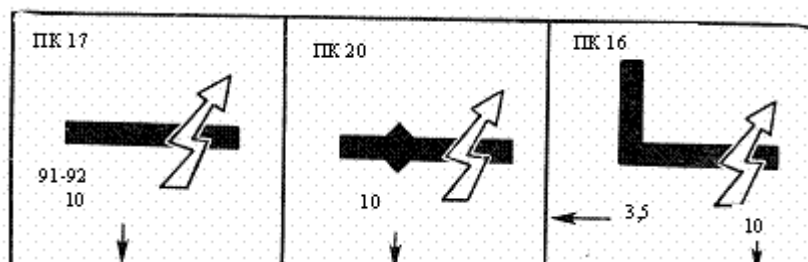


Рис. 1.5. Кабельные знаки:

*а* – траншея; *б* – кабельная муфта; *в* – поворот траншеи под углом

Собирают канал из сборного железобетона или монолитных блоков. В помещениях каналы перекрывают плитами на уровне пола, а на неохраняемой территории канал заглубляют в грунт на 300 мм, при пересечениях с автодорогой – на 700 мм и железнодорожными путями – 1000 мм (рис. 1.6).

Размеры каналов:

Ширина – 600...1200 мм, высота – 300...900 мм.

Этот способ прокладки хорошо защищает от механических повреждений, но там, где могут быть пролиты металл или агрессивные вещества, сооружение кабельных каналов не допускается (рис. 1.7).

**3. Кабельный туннель** – это подземное сооружение (коридор) с расположенными в нем опорными конструкциями для размещения на них кабелей и муфт, позволяющее производить прокладку, ремонты и осмотры со свободным проходом по всей длине (рис. 1.8)

КТ сооружают из сборного ж/б и снаружи покрывают гидроизоляцией. Заглубление – 0,5м.

Проходы в кабельных туннелях, как правило, должны быть не менее 1 м, однако допускается уменьшение проходов до 800 мм на участках длиной не более 500 мм.

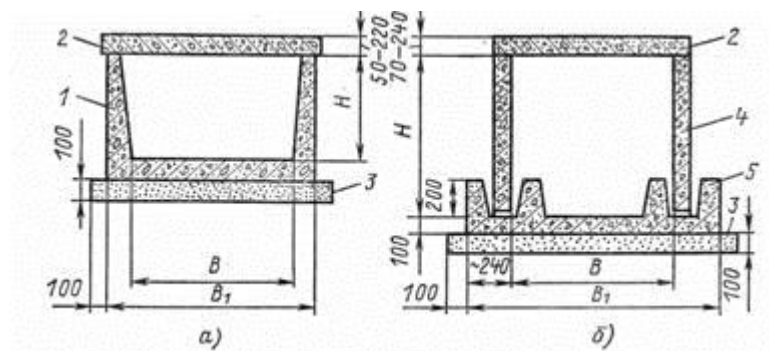


Рис. 1.6. Сборные железобетонные каналы: *а* – лотковые типа ЛК;

*б* – из сборных плит типа СК;

1 – лоток; 2 – плита перекрытия; 3 – подготовка песчаная; 4 – плита; 5 – основание.

о



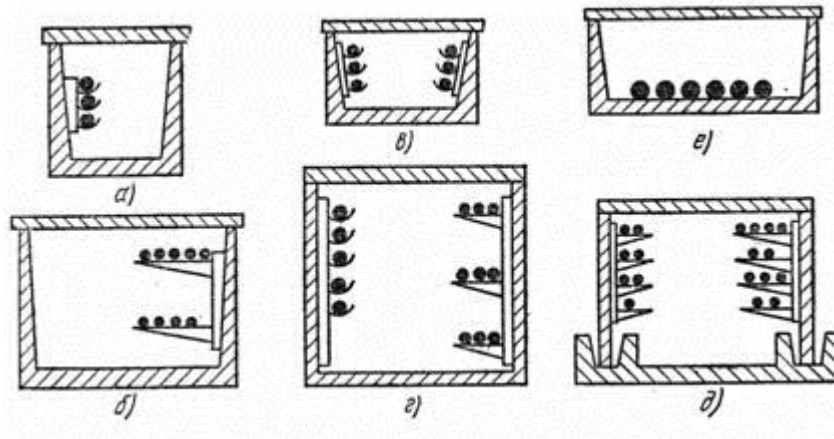


Рис.1.7. Варианты прокладки кабелей в кабельных каналах:

- а* – расположение кабелей на одной стенке на подвесах;
- б* – то же на полках; *в* – то же на обеих стенках на подвесах;
- г* – то же на одной стенке на подвесах, на другой на полках;
- д* – то же на обеих стенках на полках; *е* – то же на дне канала

Пол туннеля должен быть выполнен с уклоном не менее 1 % в сторону водосборников или ливневой канализации. При отсутствии дренажного устройства через каждые 25 м должны быть устроены водосборные колодцы размером 0,4 x 0,4 x 0,3 м, перекрываемые металлическими решетками. При необходимости перехода с одной отметки на другую должны быть устроены пандусы с уклоном не более 15°.

В туннелях должна быть предусмотрена защита от попадания грунтовых и технологических вод и обеспечен отвод почвенных и ливневых вод.

Туннели должны быть обеспечены в первую очередь естественной вентиляцией. Выбор системы вентиляции и расчет вентиляционных устройств производятся на основании тепловыделений, указанных в строительных заданиях. Перепад температуры между поступающим и удаляемым воздухом в туннеле не должен превышать 10 °С. Вентиляционные устройства должны автоматически отключаться, а воздухопроводы снабжаться заслонками с дистанционным или ручным управлением для прекращения доступа воздуха в туннель в случае возникновения пожара.

В туннеле должны быть предусмотрены стационарные средства для дистанционного и автоматического пожаротушения. Источником возникновения пожара могут быть кабели, соединительные кабельные муфты. К пожару может привести небрежное обращение с огнем и легко воспламеняющимися материалами при монтажных или ремонтных работах. Выбор пожарогасящих средств производится специализированной организацией.

В туннелях должны быть установлены датчики, реагирующие на появление дыма и повышение температуры окружающей среды выше 50 °С. Коллекторы и туннели должны быть оборудованы электрическим освещением и сетью питания переносных светильников и инструмента.

Протяженные кабельные туннели разделяют по длине огнестойкими перегородками на отсеки длиной не более 150 м с устройством в них дверей шириной не менее 0,8 м. Двери из крайних отсеков должны открываться в помещение или наружу. Дверь в помещение должна открываться ключом с двух сторон. Наружная дверь должна быть снабжена самозакрывающимся замком, открываемым ключом снаружи. Двери в средних отсеках должны открываться в сторону лестницы и быть снабжены устройствами, фиксирующими их закрытое положение. Открываются эти двери с обеих сторон без ключа.

Прокладка кабелей в коллекторах и туннелях рассчитывается с учетом возможности дополнительной прокладки кабелей в количестве не менее 15 %.

Силовые кабели напряжением до 1 кВ следует прокладывать под кабелями напряжением выше 1 кВ и разделять их горизонтальной перегородкой. Различные группы кабелей, а именно рабочие и резервные

напряжением выше 1 кВ, рекомендуется прокладывать на разных полках с разделением их горизонтальными негорючими перегородками. В качестве перегородок рекомендуются асбоцементные плиты, прессованные неокрашенные толщиной не менее 8 мм. Прокладку бронированных кабелей всех сечений и небронированных сечением жил 25 мм<sup>2</sup> и выше следует выполнять по конструкциям (полкам), а небронированных кабелей сечением жил 16 мм<sup>2</sup> и менее – на лотках, уложенных на кабельные конструкции.

Кабели, проложенные в туннелях, должны быть жестко закреплены в конечных точках, с обеих сторон изгибов и у соединительных муфт.

Во избежание установки дополнительных соединительных муфт следует выбирать строительную длину кабелей.

Каждую соединительную муфту на силовых кабелях нужно укладывать на отдельной полке опорных конструкций и заключать в защитный противопожарный кожух, который должен быть отделен от верхних и нижних кабелей по всей ширине полок защитными асбоцементными перегородками. В каждом туннеле и канале необходимо предусмотреть свободные ряды полок для укладки соединительных муфт.

Для прохода кабелей через перегородки, стены и перекрытия должны быть установлены патрубки из негорючих труб.

В местах прохода кабелей в трубах зазоры в них должны быть тщательно уплотнены негорючим материалом. Материал заполнения должен обеспечивать схватывание и легко поддаваться разрушению в случае прокладки дополнительных кабелей или их частичной замены.

Небронированные кабели с пластмассовой оболочкой допускается крепить скобами (хомутами) без прокладок.

Металлическая броня кабелей, прокладываемых в туннелях, должна иметь антикоррозионное покрытие. Расстояние между полками кабельных конструкций при прокладке силовых кабелей напряжением до 10 кВ должно быть не менее 200 мм. Расстояние между полками при установке огнестойкой перегородки при прокладке кабелей должно быть не менее 200 мм, а при укладке соединительной муфты 250 или 300 мм – в зависимости от типоразмера муфты (рис. 1.8).

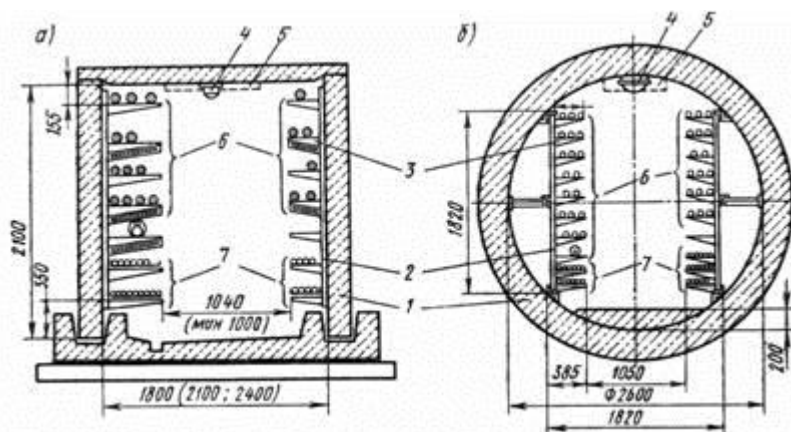


Рис.1.8. Расположение кабелей в туннеле: а – туннель прямоугольного

сечения; б – туннель круглого сечения; 1 – блок туннеля; 2 – стойка; 3 – полка; 4 – светильник; 5 – зона пожароизвещателей и трубопроводов механизированной уборки пыли и пожаротушения; 6 – силовые кабели; 7 – контрольные кабели

**4. Кабельный коллектор** – это сооружение, предназначенное для общего размещения кабельных линий, теплопроводов и водопроводов.

Коллектор сооружают из железобетонных конструкций круглого и прямоугольного сечений. Коллекторы круглого сечения делают на глубине не более 5 м закрытым способом. Коллектор снабжен вентиляцией, насосами и управляется с диспетчерского пункта. Необходимо предусмотреть телефонную связь. Размеры коллектора: диаметр – 3,6 м; ширина – 2,5 м; высота – 3,0 м (рис. 1.9).

**5. Кабельный блок** – это сооружение с трубами (каналами) для прокладки кабелей с относящимися к нему колодцами.

Кабельные блоки сооружают из железобетонных панелей длиной 6 м с 2-3 каналами внутри из асбоцементных или керамических труб. Блоки укладывают на подушку из железобетона и защищают гидроизоляцией. Глубина заложения – не менее 0,7 м, а при пересечениях – не менее 1 м. Места стыков панелей заливают раствором, предварительно заложив в зазор жгут из пакли. Через каждые 150 м устанавливают проходные или разветвительные колодцы. Минимальная высота колодцев – 1,8 м. Прокладка в блоках наиболее надежна, но менее экономична.

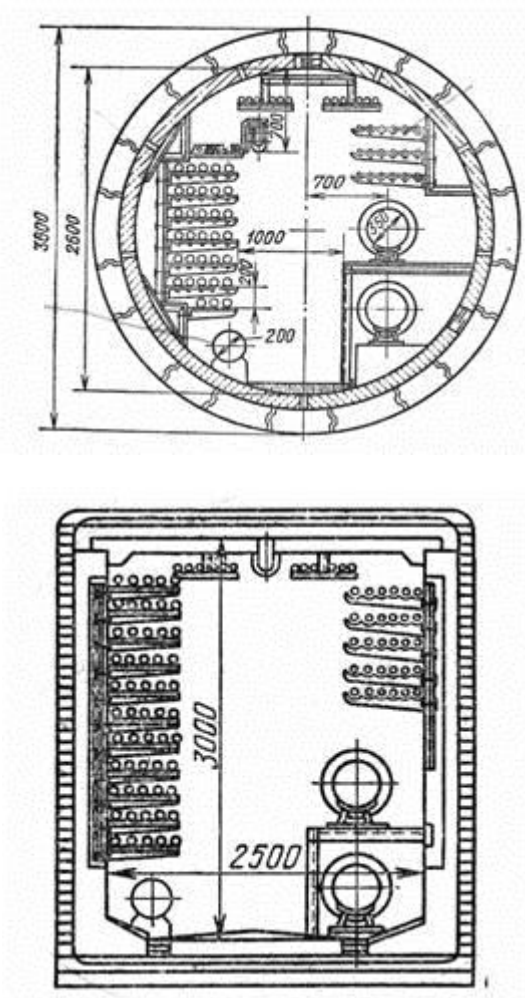


Рис. 1.9. Размещение кабелей в коллекторах круглого и прямоугольного

сечения: 1 – кабели; 2 – водотрубы; 3 – трубы теплоснабжения

Прокладка кабелей в блоках рекомендуется в следующих случаях: в местах пересечений с железными и автомобильными дорогами; при большом числе других подземных коммуникаций и сооружений; вероятности разлива металла или агрессивных жидкостей в местах прохождения кабельных трасс; прокладке кабельных линий в агрессивных по отношению к оболочке кабелей грунтах; необходимости защиты кабелей от блуждающих токов.

Для сооружения блоков применяются двух- и трехканальные железобетонные панели (рис. 1.10), предназначенные для прокладки в сухих, влажных и насыщенных водой грунтах, асбоцементные трубы для защиты кабелей от блуждающих токов, керамические трубы для защиты кабелей в агрессивных и насыщенных водой грунтах (при необходимости – и в сухих грунтах). При выборе материалов кабельных блоков следует учитывать уровень грунтовых вод и их агрессивность, а также наличие блуждающих токов.

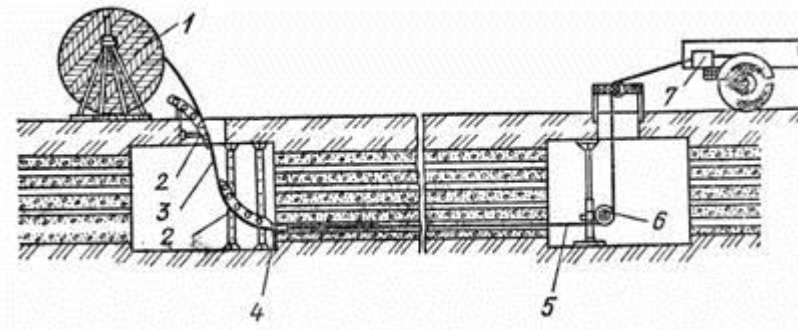


Рис.1.10. Схема протяжки кабеля в кабельном блоке:

1 – барабан с кабелем; 2 – угловой ролик; 3 – кабель; 4 – разъемная воронка;

5 – канат; 6 – ролик для каната; 7 – установка для контроля тяжения

В местах изменения направления трассы или глубины заложения блоков, а также на прямолинейных участках большой длины выполняются кабельные колодцы. Число колодцев на прямых участках блока должно быть минимальным, при этом расстояние между соседними колодцами следует принимать максимально возможным с учетом строительных длин кабелей, допустимых усилий тяжения и условий прокладки.

Габариты кабельных колодцев должны обеспечивать нормальные (условия протяжки кабелей с максимальным сечением  $(3 \times 240) \text{ мм}^2$  с радиусом изгиба кабеля  $R = 25 d$ , замену их в случае надобности, установку соединительных муфт с защитными металлическими кожухами длиной 1250 мм.

Кабельные колодцы выполняются из кирпича или сборного железобетона и бывают следующих типов: проходной прямого типа, угловой – для изменения направления блочной канализации с углами поворота 90, 120, 135 и 150°, тройниковый прямой и с углом поворота 120 и 150°, крестообразный.

Уклон пола колодца должен составлять 0,003 в сторону водосборника. Решетка водосборника должна быть металлической. Установка закладных деталей под кабельные конструкции производится в процессе монтажа колодцев.

Горловины (лазы) кабельных колодцев должны быть круглыми или, овальными и закрываться двойными металлическими крышками. На нижней крышке необходимо предусмотреть приспособление для снятия люка. Люки круглой формы рассчитаны только на одностороннюю протяжку кабелей, их диаметр должен быть не менее 700 мм, люки овальной формы рассчитаны на двустороннюю протяжку кабелей большой длины сечением до 185 мм<sup>3</sup>. Ширина овального люка – 800, длина – 1800 мм. Кабели сечением 240 мм<sup>2</sup> и выше следует протягивать без петли, в одну сторону. Колодцы должны быть снабжены стальными скобами или металлической лестницей для спуска. В связи с тем что кабельные колодцы – это дорогостоящая часть блочной канализации, рекомендуется при переходе с блочной канализации на траншейную применять кабельные камеры. При выполнении блоков из асбоцементных труб внутренние поверхности труб и их стыки должны быть смазаны битумом марки БН-IV, разведенным в керосине (2 массовые части битума и 1 массовая часть керосина). При сухих грунтах все наружные поверхности труб и их стыки необходимо защитить окрасочной гидроизоляцией в два слоя, а при влажных и насыщенных водой грунтах – оклеечной гидроизоляцией в два слоя.

У блоков, выполненных из керамических труб, в агрессивном грунте пустоты между трубами должны быть заполнены бетоном, в неагрессивном грунте – бетон нужен только в местах соединения труб, а остальная часть должна засыпаться песком или просеянным грунтом.

Глубина заложения кабельных блоков (считая от верхнего кабеля) должна быть не менее 1 м при пересечении улиц и площадей и 0,7 м во всех остальных случаях. В производственных помещениях и на закрытых территориях глубина не нормируется.

Трасса кабельных блоков прямолинейная. При пересечении инженерных сооружений трасса подходит перпендикулярно их оси. Допускается отклонение от прямого угла, но не более чем на 45°, если это продиктовано особенностями расположения места ввода блоков в здание или наличием сооружений, построенных на трассе.

Каждый кабельный блок должен иметь 10 % резервных каналов, но не менее одного канала.

**6. Кабельная эстакада** – это надземное или наземное открытое горизонтальное или наклонное протяженное кабельное сооружение. Различают проходные и непроходные эстакады. Изготавливают их из железобетона или стального проката. Расстояние между опорами – 12 м. На проходных эстакадах должны быть устроены лестничные входы, расстояние между которыми – около 150 м. В полу эстакад сооружают монтажные проемы. При небольшом числе кабелей их прокладывают по технологическим эстакадам. Этот способ прокладки, несмотря на высокую стоимость, удобен и находит все большее применение.

**7. Кабельная галерея** – это полностью или частично закрытая эстакада.

Прокладка кабелей напряжением до 10 кВ сечением до 240 мм<sup>2</sup> на эстакадах и в галереях применяется для прокладки межцеховых электрических сетей по территориям промышленных предприятий. Специальные кабельные эстакады необходимо оборудовать для прокладки кабелей по территориям химических и нефтехимических предприятий, где не исключена возможность разливы веществ, разрушительно действующих на оболочки кабелей. Допускается использовать технологические эстакады для совмещенной прокладки трубопроводов и кабелей. Кабельные эстакады выполняются непроходными железобетонными и металлическими, проходными железобетонными, металлическими и комбинированными. Непроходные эстакады выполняются таким образом, чтобы была возможность обслуживания их со специально оборудованных машин.

На рис. 1.11 представлены галереи, кабельные эстакады с солнцезащитными козырьками и без них, различных исполнений из унифицированных элементов. При совмещенной прокладке трубопроводов и кабелей эстакады выполняются индивидуально. Для кабельных эстакад приняты основные расстояния между опорами 6 и 12 м. На отдельных участках трассы при необходимости расстояние между опорами может быть 9 м. Основная высота сооружения эстакад от полотна автодороги равна 5 м. На территориях, где отсутствуют пересечения с дорогами, высота должна оставаться 2,5 м (от планировочной отметки земли) с переходами в местах пересечения с дорогами на высоту:

5 м – при пересечении с автодорогами;

6 м – при пересечении с не электрифицированными железными дорогами (от головки рельса);

7,1 м – при пересечении с электрифицированными железными дорогами (от головки рельса).

Углы поворотов эстакад, ответвления, переходы с одной отметки на другую, примыкания к зданиям, вертикальные шахты и лестницы выполняются индивидуально в каждом конкретном случае в зависимости от местных условий.

Непроходные эстакады без солнцезащищенных козырьков применяются для прокладки 16, 24 и 40 кабелей с пролетами между опорами 6 м, а для прокладки 24 и 40 кабелей – 12 м; проходные одно- и двухсекционные эстакады – для прокладки 64 и 128 кабелей с пролетами 6 и 12 м.

Расстояние между полками по вертикали на непроходных эстакадах – 200 мм, на проходных – 250 мм. Расстояние по горизонтали между полками – 1 м, но оно может быть увеличено при разработке конкретного проекта с учетом несущей способности кабельных конструкций. При прокладке кабелей в алюминиевой оболочке сечением жил 50 мм<sup>2</sup> и более расстояние между кабельными конструкциями допускаются до 6 м. Стрела провеса кабелей между конструкциями должна быть 0,4 м.

Для прокладки по эстакадам должны применяться кабели без наружного горючего покрова, имеющие антикоррозионную защиту, или с наружным защитным покровом из негорючих материалов.

Расположение кабелей на полках, расстояния между кабелями, установка соединительных муфт и другие условия такие же, что и при прокладке кабелей в туннелях (рис. 1.12).



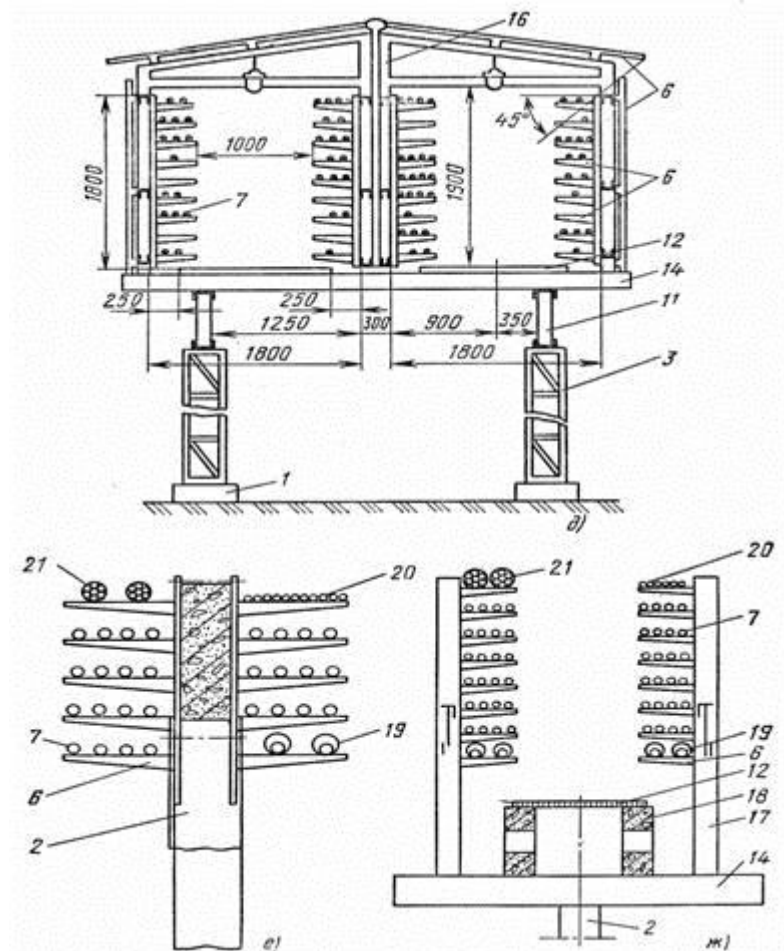


Рис. 1.11. Прокладка кабелей на кабельных эстакадах и галереях с солнцезащитными козырьками и без них (продолжение):

16 – огнезащитная перегородка; 17 – стойка; 18 – плита; 19 – соединительная муфта; 20 – контрольные кабели; 21 – пучок кабелей сечением до 16 мм<sup>2</sup>

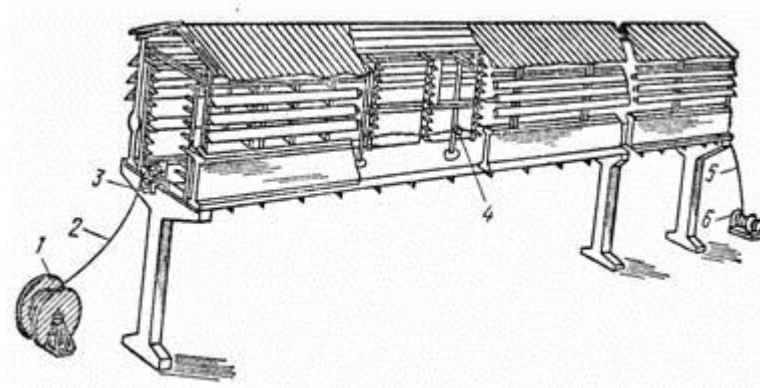


Рис.1.12. Общий вид эстакады туннельного типа:

1 – барабан с кабелем; 2 – кабель; 3 – угловой ролик; 4 – линейный ролик; 5 – канат; 6 – лебедка.

В зависимости от вида сооружения можно проложить следующее количество кабелей: земляная траншея – 6, кабельный блок – 20, кабельный канал и эстакада – 24, кабельная галерея – 56 и кабельный туннель – 72.

### 1.3. Профилактические мероприятия по повышению надёжности кабельных линий

Для обеспечения правильной эксплуатации каждой кабельной линии (КЛ) необходимы:

- 1) исполнительные чертежи на КЛ и другие кабельные сооружения;
- 2) паспорта КЛ и сооружений;
- 3) адресные списки кабельных сооружений.

Исполнительный чертёж выполняется в масштабе и КЛ привязывают к постоянным фундаментальным ориентирам. Линии разных напряжений имеют свои обозначения.

Паспорт КЛ составляется на основе приёмо-сдаточной документации и содержит следующую информацию:

- 1) марка кабеля и его длина;
- 2) схема трассы с указанием рейперных отметок;
- 3) данные о соединительных и концевых муфтах;
- 4) сведения о защите от коррозии, вибрации и механических повреждений;
- 5) сведения о профилактических испытаниях повышенным напряжением;
- 6) сведения о повреждениях и ремонте КЛ;
- 7) информация о нагрузке КЛ.

Вся эта информация должна находиться в банке данных. Правильно составленный паспорт может позволить точно оценить состояние КЛ и принять своевременное решение о капитальном ремонте линии.

Для каждой КЛ устанавливается единый диспетчерский номер. Если линия состоит из нескольких параллельных линий, тогда к номеру добавляют букву (А, Б, В и т. д.). В адресном списке указывается наименование сооружения (РП, ТП, туннель, колодец), его диспетчерский номер и адрес ближайшего городского строения.

Ежегодно в рамках составления перечня планово-предупредительных ремонтов разрабатывается номенклатура работ, в содержание которой входит:

- 1) сроки выполнения работ;
- 2) профилактические осмотры трасс КЛ;
- 3) измерение токовых нагрузок в периоды максимального и минимального потребления мощности;
- 4) профилактические испытания повышенным напряжением;
- 5) контроль за нагревом кабеля и блуждающими токами;
- 6) ремонт КЛ.

Эксплуатационный надзор за КЛ производится в соответствии с правилами технической эксплуатации [17] и местными инструкциями. Для лиц и организаций, виновных в порче кабеля, установлены штрафные санкции. Периодичность профилактических осмотров устанавливается в соответствии с [17]. Во время паводков и осенних дождей производятся внеочередные осмотры КЛ. В местах пересечений КЛ с канавами и оврагами проверяют наличие размывов и обвалов, угрожающих целостности КЛ. При осмотре КЛ проверяют:

- 1) проведение несогласованных работ на трассе;
- 2) наличие реперов;



- 3) состояние труб при вводе в здание или выхода кабеля на опору воздушной линии.
- 4) отсутствие горючих газов и легковоспламеняющихся материалов в кабельных сооружениях;
- 5) работу освещения, вентиляции;
- 6) температуру воздуха в кабельных сооружениях;
- 7) состояние антикоррозионных покрытий и строительной части (люки, двери).

Результаты проведенных осмотров КЛ регистрируются в журнале дефектов и неполадок и передаются персоналу, который непосредственно эксплуатирует эти линии. Эксплуатационный персонал обеспечивает допуск к работе на КЛ и осуществляет надзор за правильным ведением работ в указанной зоне.

Контроль за состоянием кабелей в процессе эксплуатации обеспечивается путём измерения температуры свинцовых, алюминиевых оболочек или брони. Температура измеряется термопарой. Для этой цели готовят котлован размером 900 х 900 мм и припаивают провод термопары к оболочке кабеля. Через трубу выводят провода и котлован засыпают. Температуру измеряют одновременно с замером нагрузок КЛ через каждые 2-3 часа в течение суток. В сооружениях с открытой прокладкой кабелей температуру измеряют обычным лабораторным термометром, закрепляя его на оболочке кабеля.

Измерение нагрузок производят в декабре и мае. Регистрация параметров электропотребления может выполняться самопишущими ваттметрами и амперметрами, счётчиками электрической энергии, а также по щитовым приборам, показания которых записываются в ведомость. Результаты измерений служат основанием для проведения мероприятий на КЛ, обеспечивающих их безаварийную работу. Одним из таких мероприятий является профилактические испытания КЛ повышенным напряжением. Чтобы предупредить пробой ослабленного места КЛ, их в плановом порядке испытывают повышенным напряжением постоянного тока. Линии 6...10 кВ испытывают пятикратным номинальным напряжением в течение 5 минут для каждой фазы не реже одного раза в 3 года. В процессе испытания обращают внимание на характер изменения тока утечки. КЛ считается выдержавшей испытание, если не произошло пробоя и толчков тока утечки или его нарастания, после того как ток достиг установившегося значения. До и после испытания измеряют сопротивление изоляции мегомметром на 2,5 кВ, которое не нормируется, но должно быть не менее нескольких МОм. Испытания проводят с помощью передвижной установки типа АИИ-70. После испытаний кабель должен быть разряжен через разрядное сопротивление установки.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

### 2.1. Виды и характер повреждений кабельных линий

Электрические сети состоят из отдельных элементов, связанных между собою. С точки зрения ОМП к отдельным элементам целесообразно отнести КЛ и ВЛ, трансформаторы, РУ, щиты управления, вводы, а также электродвигатели и различные электроприемники (например, светильники, электропечи).

В элементах электрической сети возникают как устойчивые, так и неустойчивые повреждения изоляции и токоведущих частей. Неустойчивые повреждения могут самоустраняться, оставаться неустойчивыми или переходить при определенных условиях в устойчивые.

В изоляции КЛ неустойчивые повреждения в большинстве случаев возникают вследствие специфических свойств бумажно-масляной изоляции. При ее пробое в разрядном промежутке создаются условия, способствующие гашению электрической дуги. Аналогично происходит в маслонаполненных силовых и измерительных трансформаторах. На фарфоровых изоляционных конструкциях РУ неустойчивые повреждения обусловлены, как правило, случайными набросами или поверхностными перекрытиями при повышенном увлажнении или загрязненности. Необходимо подчеркнуть, что количество неустойчивых повреждений значительно превосходит количество устойчивых.

Ниже приведено распределение кратности повторения кратковременных пробоев до устойчивого повреждения для 106 кабельных линий (указано число повторений без учета полного пробоя – устойчивого замыкания):

Кратность повторения кратковременных пробоев	1	2	3...10
Количество случаев, %	55	32	13

Распределение интервалов времени от первого кратковременного пробоя, относящегося к данному месту повреждения, до возникновения установившегося повреждения для этих же 106 случаев следующее:

Интервал времени	10-60 мин	1-24 ч	1-10 сут	Более 10 сут
Количество случаев	25	35	23	17

Приведенные данные свидетельствуют о постепенности развития повреждений в кабельных сетях. При этом 82 % рассмотренных случаев относились к пробоям изоляции КЛ, а 18 % – к пробоям изоляции остальных элементов сети. Следует отметить, что по многолетним данным, в кабельных сетях 6...10 кВ около 90 % причин автоматических отключений приходится на повреждения КЛ, а 10 % – на повреждения остальных элементов этих сетей.

Сочетание сигнализации кратковременных замыканий на землю с ОМП в кабельных сетях может существенно сократить число устойчивых повреждений.

По видам повреждения подразделяются на короткие замыкания (в сетях с изолированной нейтралью или компенсацией емкостных токов также «замыкания на землю») и обрывы. Короткие замыкания, бывают однофазными (однополюсные) и междуфазными (двух- и трехфазные, как с «землей», так и без «земли»). Для сетей с изолированной нейтралью или компенсацией емкостных токов существенное значение имеют также двойные замыкания на землю, т. е. замыкания двух фаз на землю в разных точках электрически связанной сети.

В большинстве случаев обрывы жил КЛ выявляются после отключения КЗ на линии. Однако встречаются случаи возникновения обрывов и без КЗ. На КЛ напряжением ниже 1000 В возникают обрывы жил (растяжки) без КЗ в тройниковых соединительных муфтах, вызванные отсутствием тока нагрузки, например в ночное время.

Распределение КЗ по видам зависит от класса изоляции и конструкции элементов сетей. По данным [1], однофазные КЗ составляют примерно 65 %, двухфазные и двойные замыкания на землю – 20 %, двухфазные замыкания «без земли» – 10 %, трехфазные замыкания – 5 %. Из этой информации следует, что в подавляющем большинстве случаев (примерно 85 %) происходит «замыкание на землю» или однофазное КЗ.

Для ОМП КЛ важное значение имеет статистическое распределение повреждений по ее элементам. По данным анализа 3649 аварий КЛ, 13,5 % повреждений приходится на соединительные муфты, 16,5 % – на концевые муфты и заделки, остальные 70 % – «целые» места кабеля. При этом на электрические пробоя изоляции в «целом» месте приходится 40 % случаев и на механические – 60 %. Характерным результатом профилактических испытаний КЛ является большая относительная повреждаемость концевых и соединительных муфт, достигающая суммарно 40...45 % (против 30 % при авариях). Это указывает, в частности, на эффективность профилактической отбраковки концевых и соединительных муфт.

Для выявления повреждений силового трансформатора существенное значение имеет их статистическое распределение по видам изоляции (на корпус, между обмотками, между витками). В частности, на основе анализа 376 повреждений трансформаторов было установлено, что 17,6 % случаев составили витковые замыкания. Этот тип повреждения не может быть выявлен при испытаниях повышенным напряжением.

## 2.2. Структура системы поиска мест повреждений

Разнообразие видов и характера повреждений, а также структуры и условий работы электрических сетей не позволяет разработать какой-либо универсальный метод ОМП. Еще более сложно создать какую-либо универсальную аппаратуру. Достаточно отметить, что необходимо находить повреждения как в сверхмощных и сверхдальних электропередачах, так и во внутренних проводках к отдельным светильникам при расстояниях в несколько метров.

К защите линий и сетей, а также разного типа повреждений к методам и устройствам ОМП предъявляются различные требования, обусловленные технико-экономическими факторами. Удовлетворить эти требования удастся только при совокупном применении методов и средств ОМП как системы с единой структурой для всех типов линий и сетей при любом характере повреждений.

Структурная схема системы ОМП, приведенная на рис. 2.1, включает четыре последовательные операции: определение поврежденного элемента; прожигание изоляции в месте повреждения; дистанционное ОМП; топографическое ОМП.

Выделение поврежденного элемента во многих случаях осуществляется автоматически при срабатывании селективной релейной защиты. Если при срабатывании релейной защиты автоматически выделяется (отключается) группа элементов (например, последовательная цепочка линий, РУ и трансформаторов), то выделение поврежденного элемента входит в систему ОМП.

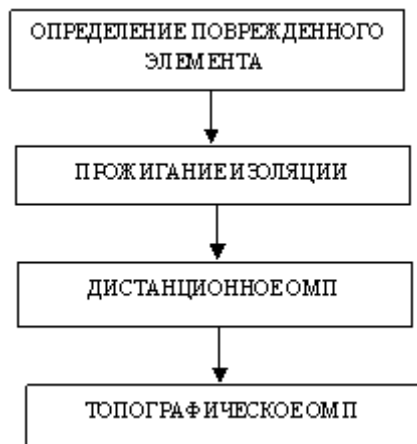


Рис.2.1. Структурная схема системы ОМП в электрических сетях

Определение поврежденных элементов приходится осуществлять не только при авариях, т. е. внезапных КЗ, но и при профилактических испытаниях. Это относится к испытаниям, одновременно охватывающим цепочки элементов или даже участки электрической сети. Способы определения поврежденных элементов зависят от характеристик сетей и видов повреждений. Вторая операция системы ОМП – прожигание. По существу, это подготовительная операция, обеспечивающая возможность использования совокупности методов ОМП. Как будет показано ниже, многие методы ОМП применимы только при переходном сопротивлении в месте повреждения изоляции не более сотен и даже единиц Ом (в отдельных случаях требуются десятки долей Ома). Снизить переходное сопротивление – задача прожигания.

При профилактическом (во время испытаний) пробое изоляции КЛ переходные сопротивления составляют десятки МОм и более. Во многих случаях остаются недопустимо большими для ОМП переходные сопротивления и при аварийных повреждениях. Поэтому прожигание изоляции КЛ в месте повреждения необходимо в подавляющем большинстве случаев. Для этой цели применяются специальные установки.

Как правило, прожигание поврежденной изоляции ВЛ, РУ и трансформаторов не требуется. Это прежде всего связано с характером повреждений изоляции названных элементов. Повторная подача рабочего напряжения на предположительно поврежденный элемент – операция, аналогичная прожиганию. Эта операция позволяет подтвердить наличие повреждения и может привести к снижению переходного сопротивления. Повторное или многократное включение поврежденного элемента – операция, входящая в систему ОМП. Для некабельной изоляции ее лишь условно можно называть прожиганием. Специальные методы и средства необходимы только для прожигания кабельной изоляции.

Общими требованиями к ОМП всех типов и классов линий электропередачи являются быстрота и точность. Наиболее быстро можно произвести дистанционное ОМП, заключающееся в измерении расстояния до места повреждения от конца или концов линии. Однако любое дистанционное ОМП обладает ограниченной точностью.

Для КЛ, проложенной в земле, нельзя достаточно определенно указать место раскопки трассы, соответствующее идеально точно измеренному расстоянию от конца линии. Расстояния до характерных точек трассы КЛ (поворотов, соединительных муфт и т. п.) в исполнительной документации указываются в планах, т. е. в горизонтальной плоскости. В действительности КЛ изменяет свое положение и по вертикали, что не отражается в документации.

Кабель укладывается в траншее без натяга, так называемой змейкой. Степень удлинения за счет такой непрямолинейной укладки учесть сколько-нибудь достоверно нельзя. Поэтому, располагая даже полной документацией, нельзя указать на трассе точку, соответствующую точному расстоянию от конца КЛ, с

погрешностью, меньшей 1...2 %. Для КЛ  $l = 3000$  м соответствующая абсолютная погрешность составит  $\pm(30...60)$  м. В условиях усовершенствованных (асфальтобетонных) покрытий раскопка участка протяженностью 60...120 м совершенно недопустима.

В современных крупных городах абсолютная погрешность для ОМП подземных КЛ не должна превышать  $\pm 3$  м. Даже для коротких КЛ с учетом не идеальности самого дистанционного измерения удовлетворить этому требованию одним дистанционным ОМП нельзя. Пусть, например, погрешность дистанционного измерения составит 1 %, погрешность топографического отсчета на местности – 2 %, тогда

для линии длиной 200 м результирующая абсолютная погрешность  $\Delta l = \pm 200 \sqrt{0,01^2 + 0,02^2} = \pm 4,5$  м. Таким образом, дистанционное ОМП позволяет быстро указать фактически не место повреждения, а зону его расположения. Требованию точности дистанционное ОМП может удовлетворить лишь на очень коротких линиях ( $l < 100$  м). Для подавляющего большинства длин КЛ необходимо, следовательно, еще один метод ОМП – топографический (трассовый).

Топографическое ОМП – это определение искомого места на трассе, т. е. топографической точки расположения места повреждения. Точность современных топографических методов для КЛ не ниже  $\pm 3$  м. Но ограничиться использованием только топографических методов, обеспечивающих необходимую точность, тоже нельзя, так как при этом не удовлетворяются требования быстроты ОМП (не более нескольких часов). При использовании топографических методов необходимо перемещаться со специальной аппаратурой по всей трассе КЛ. Знание же указанной дистанционной зоны повреждения позволяет ограничиться пределами этой зоны, т. е. резко сократить время поиска.



Рис.2.2. Схема классификации методов ОМП

На рис. 2.2 представлена схема классификации методов ОМП. Различают следующие методы ОМП:

- 1) дистанционные и топографические;
- 2) высокочастотные и низкочастотные.

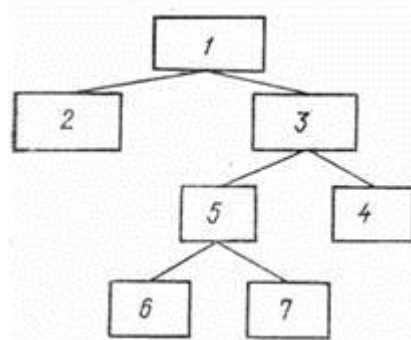
Низкочастотные методы ОМП связаны с принципиальным различием электрических процессов в объектах измерения (проводах и кабелях), в существенно разных частотных диапазонах.

Под низкочастотным диапазоном ( $f_n$ ) будем понимать частоты от нуля (постоянный ток) до нескольких килогерц. При этом для воздушных линий  $f_n = 0...1$  кГц, для кабельных линий  $f_n = 0...10$  кГц. К высокочастотному диапазону ( $f_v$ ) отнесем частоты, превышающие несколько десятков килогерц. При этом для воздушных линий  $f_v = 30...1000$  кГц, для кабельных линий  $f_v = 60...10^6$  кГц. Диапазоны частот 1...30 кГц для ВЛ и 10...60 кГц для КЛ не используются в практике ОМП. Это означает, что между двумя используемыми частотными диапазонами разница весьма существенная.

### 2.3. Характеристика высокочастотных методов ОМП

Как видно из схемы классификации, приведенной на рис. 2.2, к высокочастотным методам относится только часть дистанционных методов ОМП. Прежде всего рассмотрим импульсные методы, принцип

действия которых основан на измерении интервалов времени распространения электромагнитных волн (импульсов) по участкам линий.



**Рис.2.3. Схема классификации импульсных методов ОМП:**

1 – импульсные методы; 2 – локационные методы; 3 – волновые методы; 4 и 5 – волновые односторонние и двусторонние измерения;

6 и 7 – предварительная и последующая посылки хронизирующих сигналов

По признаку использования для отсчета времени специально генерируемых импульсов или же возникающих в месте повреждения линии электромагнитных волн выделяют локационные и волновые методы. В свою очередь волновые методы подразделяют на двусторонние и односторонние по фиксации моментов прихода фронтов волн на обоих концах линии или на одном конце. При двусторонних измерениях необходима посылка так называемых хронизирующих сигналов, обеспечивающих «привязку» к общему началу отсчета времени измерительных элементов на обоих концах линии. По периоду посылки хронизирующих сигналов различают методы с предварительным и с последующим хронизирующими сигналами. Описанная классификация схематически показана на рис. 2.3.

Классификация полностью охватывает все существенные различия между известными в настоящее время методами. В табл. 2.1 для сопоставления приведены классификации, принятые в России, США и Японии.

**Т а б л и ц а 2.1**

### Классификация методов ОМП

Классификации методов, принятая в России			Классификация методов, принятая в США и Японии
Локационный			С, F, К
Волно- вые	Односторонние измерения		А
	Двусторонние измерения	С предварительной посылкой хронизирующего сигнала	Д, Р
		С последующей посылкой хронизирующего сигнала	В, Е

*Локационный метод* [2] основан на измерении времени между моментами посылки в линию зондирующего электрического импульса и прихода к началу линии импульса, отраженного от места повреждения. Трасса распространения импульсов в поврежденной линии и временные соотношения показаны на рис. 2.4.

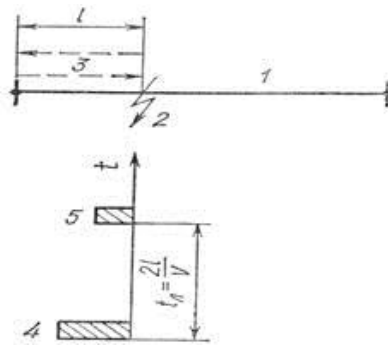


Рис.2.4. Трасса распространения импульсов и временные соотношения при локационном методе ОМП:

1 – линия; 2 – место повреждения; 3 – трасса распространения импульсов; 4-5 – зондирующий и отраженный импульсы

Послав в линию импульс, измеряют время двойного пробега этого импульса до места повреждения  $t_d$ . Расстояние до места повреждения определяют по формуле

$$l = \frac{t_d}{2} U, \quad (2.1)$$

где  $U$  – скорость распространения импульса в линии.

Локационные измерения подразделяются на автоматические и неавтоматические. Первые используются для ВЛ, включенных в находящуюся под рабочим напряжением электрическую сеть. При срабатывании релейной защиты запускается автоматический локационный искатель, который фиксирует искомое расстояние за время, меньшее одной десятой доли секунды. Если в результате успешного АПВ линия остается в работе, то на основе полученного замера можно выполнить профилактический ремонт.

Измерения в период горения дуги КЗ – важное условие ОМП на ВЛ. После погасания дуги на поврежденной ВЛ получить необходимый отраженный импульс при неавтоматической локации в большинстве случаев не удастся. На КЛ неавтоматическая локация весьма эффективна.

*Волновой метод* [2] основан на измерении времени между моментами достижения концов линии фронтами электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения.

На рис. 2.5, а показан один провод линий электропередачи длиной  $L$ , который в момент повреждения  $t = 0$  заряжен до напряжения  $U$ , например положительной полярности. При возникновении пробоя изоляции этого провода на землю в некоторой точке, удаленной от конца линии на расстояние  $l'$ , напряжение в этой точке становится равным нулю. Вследствие этого в месте повреждения возникают распространяющиеся в обе стороны электромагнитные волны напряжением  $-U$ , стремящиеся со скоростью  $v$  распространить нулевой потенциал по всей линии (рис. 2.5, б).

По истечении времени  $t_1 = (L - l')/v$  фронт одной из волн достигает ближнего (левого на рис. 2.5, в) конца линии, а через интервал  $t_2 = l'/v$  фронт второй волны достигает дальнего конца. Временные соотношения показаны на рис. 2.5, г. Временной интервал рассчитывается по формуле

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2l'}{v} - \frac{L}{v}. \quad (2.2)$$

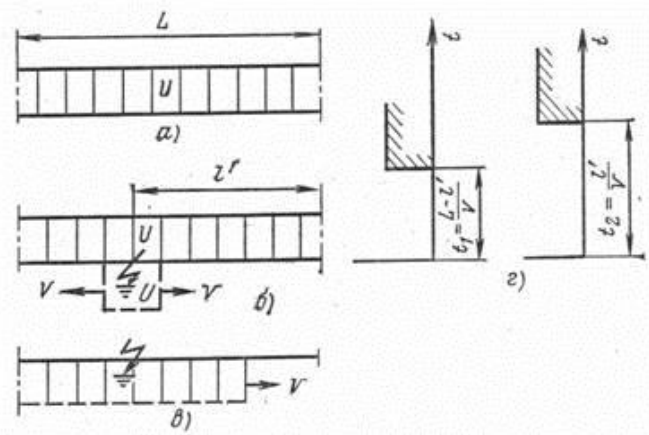


Рис. 2.5. Диаграмма распространения волн и временные соотношения

при волновом методе ОМП:

*a* – напряжение на линии перед повреждением; *б* – распространение волн непосредственно после пробоя; *в* – расположение фронтов волн в момент достижения одним из них конца линии; *г* – временные соотношения

Если повреждение произошло в середине линии ( $l' = L/2$ ), то фронты волн достигают обоих концов одновременно:  $t_2 = t_1$  и  $\Delta t = 0$ . При  $l' > L/2$ ,  $t_2 > t_1$  и  $\Delta t > 0$  (положительная величина). При  $l' < L/2$ ,  $t_2 < t_1$  и  $\Delta t < 0$  можно измерить величину  $-\Delta t = t_1 - t_2 > 0$ . Учитывая, что длина линии  $L$  известна, можно из предыдущего уравнения определить расстояние до места повреждения:

$$l' = \frac{L}{2} - \frac{\Delta t}{2} v. \quad (2.3)$$

Поскольку точность измерения интервала  $\Delta t$  составляет единицы микросекунд, то с такой же точностью необходимо вести синхронный счет времени на обоих концах линии. При современном уровне техники возможна посылка с одного (ведущего) конца линии на другой (ведомый) хронизирующих сигналов, обеспечивающих привязку моментов отсчета.

*Волновой метод двусторонних измерений с предварительными хронизирующими сигналами* поясняется на рис. 2.6. На обоих концах линии непрерывно ведут счет времени одинаковые счетчики. Со стороны ведущего конца (левая часть рисунка) периодически поступают хронизирующие импульсы, обеспечивающие синхронность хода счетчиков.

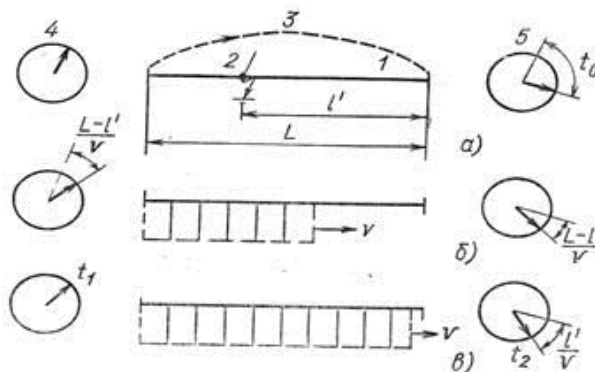


Рис. 2.6. Временные соотношения при волновом методе двусторонних измерений с предварительными хронизирующими сигналами:

*a* – момент возникновения повреждения; *б* – момент достижения фронтом волны ближнего от места повреждения конца линии; *в* – момент достижения фронтом волны дальнего конца линии; *г* – линия; *д* – место повреждения;

*з* – трасса хронизирующих сигналов; *4* и *5* – ведущий и ведомый счетчики

Счетчики могут синхронизироваться и непрерывными синусоидальными сигналами, это не вносит существенных отличий. Поскольку время распространения хронизирующих сигналов вполне определенное, то

начало отсчета на ведомом конце в любой момент времени сдвинуто по отношению к началу работы ведущего счетчика на известное время  $t_0$  (рис. 2.6, а). Если хранирующие сигналы передаются по самой обслуживаемой линии, то  $t_0 \ll L/v$ . Хранирующие сигналы могут передаваться по какому-либо каналу связи, например радиорелейной линии. При этом интервал времени  $t_0$  также известен.

Возникающие в момент КЗ электромагнитные волны распространяются к обоим концам линии. В моменты достижения фронтами волн концов линии соответствующие счетчики останавливаются.

В соответствии с рис. 2.6 разность показаний счетчиков

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2l'}{v} + t_0 - \frac{L}{v}. \quad (2.4)$$

Откуда

$$l' = \frac{L - t_0 v}{2} + \frac{\Delta t}{2} v. \quad (2.5)$$

*Метод стоячих волн* называют еще «высокочастотным». Он основан на измерении полного входного сопротивления поврежденной линии в широком диапазоне частот.

К началу линии, имеющей обрыв или КЗ, присоединяют генератор переменной частоты (ГПЧ) и вольтметр  $V$  (рис. 2.7, а) и снимают зависимость показаний вольтметра от частоты. Характер этой зависимости показан на рис. 2.7, в. Изменения напряжения вдоль линии при КЗ и резонансе показаны на рис. 2.7, б. По мере изменения частоты входное сопротивление периодически меняется, вследствие чего меняются показания вольтметра. Для любого волнового канала (определенного подключения к проводам линии) характер изменения входного сопротивления аналогичен.

Если взять для упрощения волновой канал линии без потерь, замкнутый на активное сопротивление  $R$ , то полное входное сопротивление  $z$  будет определяться следующим выражением:

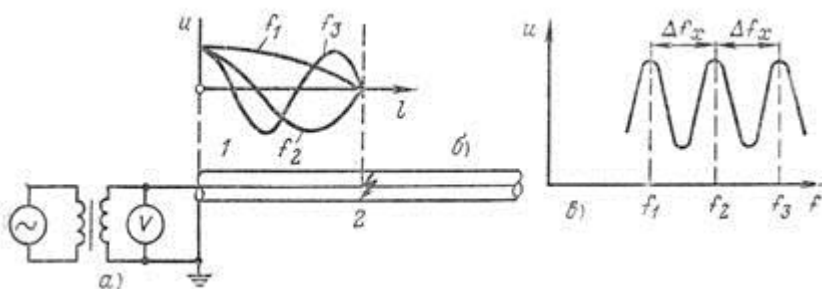


Рис 2.7. Измерения методом стоячих волн:

а – принципиальная схема соединений; б – изменение напряжения вдоль линии при резонансе; в – изменение напряжения в начале линии

в зависимости от частоты;  $l$  – кабель; 2 – место КЗ

$$z = z_B \frac{R/z_B + jtg \frac{\omega l}{v}}{1 + j(R/z_B)tg \frac{\omega l}{v}}, \quad (2.6)$$

где  $z_B$  – волновое сопротивление данного канала линии;  $l$  – длина линии;  $v$  – фазовая скорость распространения по данному каналу.



Пусть  $R = 0$ , т. е. на расстоянии  $l$  имеет место КЗ, тогда

при  $\omega l / v = (2k + 1) (\pi/2)$  значение  $z \rightarrow \infty$ ,

при  $\omega l / v = k\pi$  значение  $z = 0$ ,

где  $k = 0, 1, 2 \dots$  – кратность соответствующей резонансной частоты. Последнему случаю соответствует резонансная частота генератора

$$f = \omega / 2\pi = kv / 2l. \quad (2.7)$$

Аналогично для линии на х. х. (разомкнутой) резонансная частота:

$$f = (2k + 1)v / 4l. \quad (2.8)$$

Интервал между соседними резонансными частотами, соответствующими минимальным или максимальным показаниям вольтметра, в обоих случаях (обрыв или КЗ) составляет

$$\Delta f_x = v / 2l_x, \quad (2.9)$$

откуда искомое расстояние до места повреждения

$$l_x = v / 2\Delta f_x. \quad (2.10)$$

#### 2.4. Характеристика низкочастотных методов ОМП

Низкочастотные дистанционные методы ОМП, основанные на измерении параметров аварийного режима, сегодня находят все большее применение. Параметры аварийного режима (ПАР) – это такие комбинации токов и напряжений промышленной частоты в аварийном режиме, по которым можно вычислить расстояние до места КЗ. Эти параметры фиксируются, т. е. измеряются и запоминаются непосредственно в период протекания токов КЗ в электроэнергетической системе, элементом которой является поврежденная линия. Как и автоматическое импульсное ОМП, измерение ПАР осуществляется до автоматического отключения линии высоковольтным выключателем.

Рассматриваемые методы подразделяются на односторонние и двусторонние в зависимости от расположения измерительных средств по сторонам (концам) линии. Наибольшее распространение получили двусторонние методы, позволяющие исключить влияние переходного сопротивления в месте КЗ на результат расчета искомого расстояния. При возникновении внезапного КЗ на включенной в сеть линии с глухозаземленной нейтралью (110...750 кВ) специальные фиксирующие приборы (ФП) запоминают значения ПАР на концах поврежденной ВЛ.

Эти зафиксированные значения вместе с заранее известными постоянными линии и примыкающей к ней сети используются для вычисления расстояния до места КЗ. Иногда используются показания ФП на соседних с поврежденной ВЛ. Вычисления могут производиться вручную, по графикам, номограммам и с помощью ЭВМ. В большинстве случаев в качестве ПАР служат напряжения и токи нулевой последовательности.

Односторонние методы позволяют непосредственно измерять расстояние до места КЗ. Однако в этом случае существенное влияние на результаты измерения оказывает переходное сопротивление, особенно при наиболее распространенном виде повреждения – однополюсном КЗ. Эти методы стали использоваться лишь в последние годы. Весьма ограниченно применение петлевого и емкостного методов.

*Петлевой метод* основан на измерении сопротивления постоянному току отрезков жил кабеля. В тех случаях, когда жила, замкнутая в месте повреждения на оболочку, не имеет обрыва и, кроме того, в кабеле имеется одна «здоровая» жила, определение расстояния до места повреждения можно осуществить петлевым методом, основанным на использовании моста постоянного тока.

Четыре сопротивления  $A, B, C$  и  $D$  (рис. 2.8) образуют замкнутый четырехугольник; в одну диагональ его включен гальванометр  $G$ , в другую – источник питания с ЭДС, равной  $E$  (обычно батарея гальванических элементов). Если при включенной батарее стрелка гальванометра  $G$  не будет отклоняться (нулевое

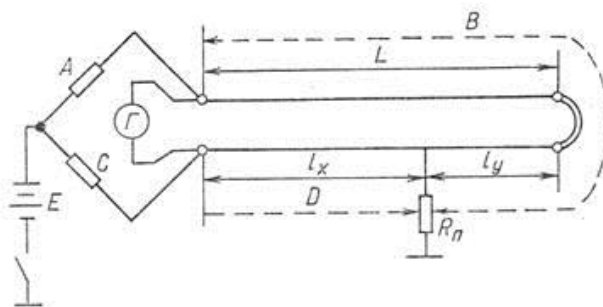


Рис.2.8. Принципиальная схема определения места повреждения петлевым методом

Для осуществления схемы петлевого измерения необходимо на одном конце кабельной линии соединить поврежденную и неповрежденную жилы перемычкой (сечением не менее, чем у жил кабеля), обеспечив контакт с малым сопротивлением. Обычно перемычка изготавливается из гибкого многожильного медного троса с надежными зажимами из латуни. На другом конце кабеля к этим же жилам присоединяется измерительный мост со стрелочным гальванометром и батареей. Сопротивления  $A$  и  $C$  подбираются на измерительном мосте, а  $B$  и  $D$  представляют собой сопротивление жил кабеля (рис. 2.8). При этом сопротивление петли  $B + D$  всегда равняется удвоенному сопротивлению жилы кабеля  $R$ , т. е.  $B + D = 2R$ .

Так как при одном и том же сечении жилы ее сопротивление пропорционально длине, то можно записать соотношение

$$l_x = 2LC/(A + C), \quad (2.11)$$

позволяющее после установления равновесия моста и фиксации значений  $A$  и  $C$  вычислить искомое расстояние  $l_x$ .

Так как сопротивление жил кабеля мало по сравнению с сопротивлениями  $A$  и  $C$  моста, то соединительные провода от кабеля к мосту также влияют на результат измерений.

Напряжение батареи для питания моста зависит от переходного сопротивления в месте повреждения кабеля и может быть выбрано на основе следующих ориентировочных соотношений:

Переходное сопротивление

в месте повреждения, Ом	100	1000	10 000
Напряжение батареи, В	4...6	20...30	100...250

При больших переходных сопротивлениях (до 1 МОм) применяют высоковольтные реохордные мосты.

$$L + l_y = \frac{2LC_1}{A_1 + C_1},$$

Установку равновесия моста производят постепенным подбором измерительных плеч  $A$  и  $C$ . После установки равновесия моста и подсчета значения необходимо поменять местами концы проводов, идущих от жил кабеля к мосту, и провести новое измерение. Если новому равновесию моста будут соответствовать сопротивления его плеч  $A_1$  и  $C_1$ , то в результате этого измерения можно получить величину

где  $l_y$  – расстояние от места повреждения до конца кабеля, на котором установлена закоротка (рис. 2.8).

На основании двух измерений можно произвести проверку, имея в виду, что  $l_x + L + l_y = 2L$ . Если оба результата в сумме не составляют двойной длины кабеля и значительно отличаются от нее, то это означает, что плечи моста подобраны недостаточно точно и измерения следует повторить, проверив все контакты в схеме.

Погрешность при ОМП петлевым методом складывается из погрешности самого измерения и погрешности, связанной с неточным знанием трассы, длины линии и сечения ее участков.

Относительная погрешность измерения  $\Delta I_x/L$  при петлевом методе может быть ориентировочно оценена по формуле

$$\frac{\Delta I_x}{L} \approx 2 \Delta i \frac{R_T}{E} \left( 1 + \frac{C}{A} \right) \left( 1 + \frac{R_T}{2R} \right), \quad (2.12)$$

где  $\Delta i$  – ток небаланса гальванометра с внутренним сопротивлением  $R_T$ , обуславливающий погрешность  $\Delta I_x$ .

Решающее влияние на точность мостовых измерений оказывают чувствительность гальванометра и отношение напряжения питания к переходному сопротивлению в месте повреждения. Поэтому для кабельных измерений применяют гальванометры с чувствительностью  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  А/мм.

Область целесообразного использования петлевого метода весьма ограничена. Его приходится использовать или при отсутствии импульсных приборов, или при расположении места повреждения в воде, когда переходное сопротивление не удастся снизить прожиганием ниже нескольких кОм. Импульсные методы более удобны, точны и менее трудоемки. Серийно выпускаемые промышленностью мосты постоянного тока (типов УМВ и МО-6) и универсальные кабельные мосты (типов Р333 и Р334) имеют сравнительно низкую чувствительность гальванометров. При пользовании этими мостами желательно подключать выносные дополнительные гальванометры с чувствительностью  $10^{-7}$  А/мм.

*Емкостный метод.* При обрывах жил кабеля в некоторых случаях возможно применять емкостный метод. Расстояние до места обрыва определяется по значению измеренной емкости жил участка КЛ. Измерение производится с помощью мостов переменного тока, обычно на частоте 1000 Гц. В качестве нуля-индикатора используется телефон.

Мостами переменного тока можно измерять емкость при обрывах с сопротивлением изоляции в месте повреждения не менее 300 Ом. При меньших сопротивлениях точность измерения снижается ниже допустимого значения. Все жилы кабеля, кроме измеряемой, заземляют, для того, чтобы уменьшить влияние их емкости на результаты измерения. Измерение емкости на постоянном токе может быть применено лишь при таком обрыве жил кабеля, когда переходное сопротивление в месте обрыва превышает 20 МОм.

Из отечественных серийных устройств в настоящее время наиболее подходящим для измерения емкости является универсальный кабельный мост Р334.

Емкостный метод по точности и удобству измерений значительно уступает импульсному и должен применяться лишь при отсутствии импульсных приборов.

Все известные топографические методы относятся к низкочастотным. Наиболее распространенным и важным из них является индукционный, используемый на КЛ и ВЛ, а также на внутренних проводках.

*Индукционный метод* улавливает характер изменения магнитного поля трассы, создаваемого протекающим по линии током. Измеряется как ток промышленной частоты и его высшие гармонические составляющие, так и ток повышенной частоты (0,4...10 кГц) специального генератора. К индукционным относятся и направленные (фазочувствительные) устройства, содержащие помимо датчиков магнитного поля еще и датчики электрического поля (например, штыревые антенны). Оператор с переносным приемным устройством перемещается вдоль трассы линии, определяя по различным признакам, находится ли он до или после места повреждения. Иногда по ряду признаков можно определить само место повреждения.

В табл. 2.4 сгруппированы методы определения места повреждения кабеля.

Т а б л и ц а 2.4

#### Рекомендуемые методы определения места

#### повреждения кабеля

Вид повреждения кабеля	Пробивное напряжение в месте повреждения, кВ	Переходное сопротивление в месте повреждения, Ом	Метод определения зоны повреждения	Метод точного определения места повреждения на трассе кабельной линии
Замыкание жилы на оболочку	0...25	0...40	Импульсный, петлевой	Метод измерения потенциалов, метод накладной рамки
		40...200	Импульсный, колебательного разряда, петлевой	Акустический, метод измерения потенциалов
		200...300	Колебательного разряда, петлевой	Акустический

Вид повреждения кабеля	Пробивное напряжение в месте повреждения, кВ	Переходное сопротивление в месте повреждения, Ом	Метод определения зоны повреждения	Метод точного определения места повреждения на трассе кабельной линии
Замыкание двух или трех жил между собой (и на землю) в одном месте	0...25	0...40	Импульсный, петлевой (при наличии неповрежденной жилы)	Индукционный
		40...200	Импульсный, колебательного разряда	Акустический
		200...3000	Колебательного разряда	»

Обрыв токо- ведущих жил без заземления	До испытательного	$\square 10^6$	Импульсный, колебательного разряда, емкостный	»
Обрыв токо- ведущих жил с замыканием на землю	0...10	0...200 с дожиганием до двухфазного к. з. $\square 200$	Импульсный  Колебательного разряда	Индукционный  Акустический
Заплывающий пробой	От 8 до испытательного	$\square 10^7$	То же	»

*Акустические методы* основаны на улавливании на трассе акустических (механических) колебаний, возникающих на поверхности грунта или асфальтобетонного покрытия при искровом разряде в изоляции КЛ. Оператор с акустическим датчиком и усилителем перемещается в зоне  $\pm(15...40)$  м, выделенной дистанционным методом, и определяет место максимального уровня приема по индикатору или на слух с помощью телефона. Искровой разряд в месте повреждения изоляции создается посредством специальных устройств, подключаемых на конце КЛ.

*Потенциальные методы* основаны на фиксации вдоль трассы электрических потенциалов, создаваемых протекающими по оболочке КЛ и в земле токами. Используются постоянный и переменный токи повышенной частоты (звукового диапазона). Оператор перемещается по трассе с двумя контактными стержнями или пластинами. В первом случае осуществляется непосредственное измерение разности потенциалов, во втором – через емкость пластин. Пластины используются при асфальтобетонных покрытиях на трассе КЛ. В переносное устройство входят усилитель и индикатор. Ток в поврежденную жилу подается с конца КЛ.

*Электромеханические методы* основаны на фиксации механических усилий, создаваемых за счет энергии тока КЗ. Могут использоваться электродинамические усилия между током в токоведущих частях и наводимым током в расположенном вблизи датчике и электромагнитные силы, приложенные к якорю из магнитного материала. Электромеханические устройства (указатели) устанавливаются стационарно в РУ и на опорах ВЛ. Протекание тока КЗ через контролируемый объект сигнализируется с помощью бликера. Восстановление исходного состояния указателя в ряде конструкций осуществляется автоматически при включении ВЛ под напряжение.

Акустические, потенциальные и электромеханические методы удобно объединить в одну общую группу так называемых контактных методов.

### 3. ПРОЖИГАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ В МЕСТЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ

#### 3.1. Требования к методике и основные этапы процесса прожигания

Основным назначением прожигания дефектной изоляции является снижение переходного сопротивления в месте дефекта, что позволяет применять методы, обеспечивающие быстрое и точное ОМП. Для большей части эффективных методов ОМП требуется, чтобы переходное сопротивление в месте повреждения было снижено до десятков или даже долей единиц Ома. Кроме того, для наиболее результативного применения

индукционного метода весьма желательно «перевести» однофазное повреждение в двухфазное. Все это достигается путем прожигания изоляции в дефектном месте с помощью специальных установок.

Прожигание производится за счет энергии, выделяющейся в канале пробоя. При этом происходит обугливание изоляции в месте повреждения и снижение переходного сопротивления. Следует отметить, что прожигание также позволяет непосредственно и просто выявлять повреждения в концевых разделках и на открытых кабелях по нагреву, появлению дыма и запаха гари.

Стоимость, габариты и масса устройства для прожигания являются определяющими для всего комплекса аппаратуры, используемой в процессе поиска мест повреждения кабелей. На прожигание приходится в большинстве случаев и основные составляющие затрат труда и времени при ОМП кабелей. Методы и устройства для прожигания должны удовлетворять следующим требованиям:

1) обеспечивать обугливание и разрушение изоляционного материала в месте повреждения. Кроме того, для применения большинства методов ОМП (импульсных, индукционных и т. д.) необходимо создание проводящего мостика за счет выплавления металлических частиц из жилы и оболочки и снижение переходного сопротивления до единиц и долей Ома. Для применения же акустического метода необходимо разрушить проводящий мостик или исключить его образование;

2) оказывать минимальное воздействие на неповрежденную изоляцию;

3) предусматривать минимальные значения капитальных и эксплуатационных затрат;

4) иметь минимальные габариты и массу;

5) обеспечивать безопасные условия эксплуатации. Как будет видно из дальнейшего, оптимальный режим прожигания реализуется при последовательном чередовании ступеней прожигания. Каждая ступень должна обеспечивать выделение максимальной энергии за минимальное время в поврежденном месте изоляции и обеспечивать наивысший КПД прожигания

$$\eta = \frac{W_{\text{пр}}}{W_{\text{пр}} + W_{\text{п}}}, \quad (3.1)$$

где  $W_{\text{пр}}$  – энергия, выделяемая в месте повреждения;  $W_{\text{п}}$  – потери энергии в элементах схемы.

Основным видом изоляции силовых кабелей является бумажно-масляная изоляция. Ряд характерных свойств этой изоляции и вызывает необходимость в создании специальных устройств, обеспечивающих более или менее длительное выделение энергии в месте повреждения. В других видах изоляции (полиэтилен, поливинилхлорид и т. п.) условия прожигания существенно легче. Поэтому рассмотрим прожигание бумажно-масляной изоляции. Изоляция трехжильных кабелей напряжением 1...10 кВ должна отвечать следующим требованиям:

Номинальное напряжение кабеля, В.....	1	6	10
Толщина изоляции жилы, мм.....	0,75...0,85	2	2,75
Толщина поясной изоляции, мм.....	0,5...0,6	0,95	1,25

Толщина изоляции жилы кабелей 35 кВ с отдельно оцинкованными жилами составляет 9...11 мм.

Изоляция состоит из лент кабельной бумаги толщиной 0,12 мм (реже 0,17 мм) и шириной около 15 мм, накладываемых с зазором 0,2...0,3 мм таким образом, чтобы очередной слой перекрывал зазоры предыдущего. Например, изоляция жил кабеля 6 кВ состоит из 18...20, а поясная – из 7...8 лент. Для придания кабелю жесткой округлой формы перед наложением металлической защитной оболочки используются бумажные заполнители. Бумажная изоляция под вакуумом пропитывается маслосиликоновым составом.

Электрическая прочность неповрежденной изоляции кабеля 6 кВ составляет 200...250 кВ, испытательное постоянное напряжение – 35...40 кВ. Поэтому повреждаются в подавляющем большинстве случаев явно дефектные места, причем протяженность дефектного участка измеряется долями миллиметра, реже – миллиметрами. Первоначальный пробой кабельной изоляции лишь

иногда носит характер радиального, т. е. проходящего по кратчайшему пути между жилой и оболочкой или между жилами. Поскольку напряженность электрического поля в кабеле имеет как радиальную, так и тангенциальную составляющую, путь пробоя обычно существенно длиннее кратчайшего расстояния между электродами. При пробое за счет тепловой энергии происходит разложение пропитывающего состава, сопровождающееся газовыделением. При этом, с одной стороны, вытесняется пропиточный состав с трассы пробоя, что снижает электрическую прочность, с другой стороны, поднимается давление в образующихся полостях, повышающее эту прочность. После пробоя давление снижается и полость начинает заполняться пропитывающим составом. Вследствие этого повторный пробой по сравнению с первым происходит обычно при несколько меньшем напряжении. При жирной пропитке напряжение пробоя может даже немного повыситься. Движение частиц массы способствует также некоторому смещению трассы пробоя. Многократное повторение пробоев приводит к образованию более или менее устойчивого разрядного канала. Эту стадию процесса целесообразно назвать начальным этапом прожигания.

Место повреждения на этом этапе можно представить схемой замещения, изображенной на рис. 3.1, а, где  $C$  – емкость кабеля;  $P_p$  – разрядник, напряжение пробоя которого соответствует напряжению пробоя разрядного канала;  $r_d$  – сопротивление, условно отражающее выделение активной энергии при разряде емкости кабеля на разрядный канал;  $U_0$  и  $r_0$  — напряжение и внутреннее сопротивление источника, подключенного к КЛ.

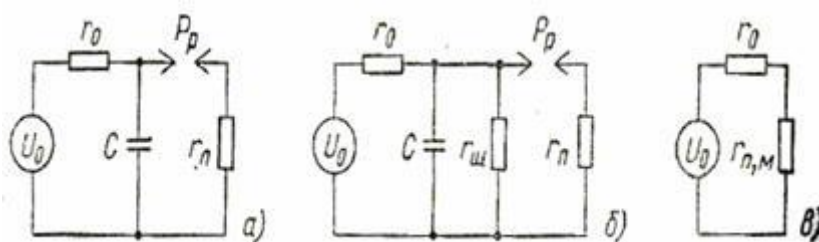


Рис. 3.1. Схема замещения КЛ на различных этапах прожигания поврежденной изоляции: а, б, в – начальный, промежуточный и заключительный этапы соответственно

Как показывают исследования, при пробое, сопротивление канала значительно меньше волнового сопротивления кабеля. Поэтому после пробоя изоляции заряженного кабеля происходит процесс колебательного разряда с затратами энергии на активные потери в разрядном канале и кабеле. Коэффициент затухания силового кабеля  $\square = (2,5 \dots 5) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{1/2}/\text{км}$ . С учетом указанного значения  $\square$  и опытных данных практически полное затухание процесса колебательного разряда для кабелей длиной от 0,1 до 5 км

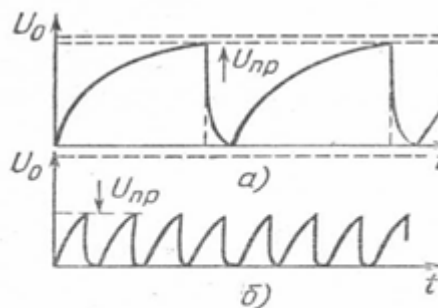
наступает через 50...300 мкс. Активными потерями в жилах и изоляции кабеля управлять не представляется возможным, но в схеме замещения ту часть активной энергии, которая выделяется в разрядном канале, можно всегда эквивалентировать потерями в таком сопротивлении  $r_n$ , при разряде емкости  $C$  на которое выделится столько же тепла, сколько в действительных условиях.

При достаточно длительном повторении пробоев разложение пропиточного состава вблизи разрядного канала приводит к осушению прилегающей к нему области, что вызывает обугливание стенок канала. Схема замещения для этого промежуточного этапа прожигания приведена на рис. 3.1, б, где  $r_{ш}$  – сопротивление, шунтирующее разрядный канал;  $r_3 = r_0 r_{ш} / (r_0 + r_{ш})$  – эквивалентное сопротивление схемы. По мере обугливания стенок канала и прилегающей области изоляции значение сопротивления  $r_{ш}$  снижается. При прожигании на промежуточном этапе используются энергия разряда и тепло, выделяемые в сопротивлении  $r_{ш}$  (в обугленной изоляции).

Дальнейшее обугливание приводит к прекращению разрядов и образованию более или менее устойчивого проводящего мостика. Схема замещения для этого заключительного этапа прожигания представлена на рис. 3.1, в, где  $r_{п, м}$  – сопротивление проводящего мостика между жилой и оболочкой (или между двумя жилами) кабеля.

Для использования индукционного метода определения места повреждения, как уже отмечалось, требуется снижение значения  $r_{п, м}$  до единиц и даже долей единицы Ома. Для удовлетворения последнего требования недостаточно полного обугливания канала. Необходимо создание не угольного, а металлического проводящего мостика между жилой и оболочкой кабеля (либо между двумя жилами). Это достигается за счет выплавления с поверхностей жилы и оболочки металлических частиц, постепенно заполняющих разрядный канал. Выплавление происходит при токах в несколько десятков ампер.

### 3.2. Прожигание изоляции от источника постоянного напряжения



Идеальный источник постоянного напряжения. Анализ удобно проводить с помощью схем замещения, представленных на рис. 3.1. На начальном этапе прожигания (рис. 3.1, а) процесс протекает следующим образом. От источника  $U_0$  емкость кабеля заряжается с постоянной времени  $r_0 C$ . Напряжение, приложенное к изоляции, изменяется по закону:

$$u = U_0 (1 - e^{-t/(r_0 C)}) \quad (3.2)$$

до напряжения пробоя  $U_{пр}$  разрядного канала (разрядника). После пробоя емкость кабеля разряжается через место дефекта. Приближенно (без учета индуктивности кабеля) можно записать:

$$u = U_{пр} (1 - e^{-t/(r_{п} C)}) \quad (3.3)$$

Рис. 3.2. Изменение напряжения на разрядном канале при прожигании от идеального источника постоянного напряжения:

$$a - U_{пр} = 0,95U_0; \quad б - U_{пр} = 0,43U_0$$

Внутреннее сопротивление источника составляет кОмы, а чаще – многие десятки кОм. Сопротивление  $r_{п} < 50$  Ом, поэтому  $r_0 > r_{п}$  и заряд емкости кабеля происходит во много раз дольше, чем разряд. Изменение напряжения в месте пробоя в начальный период прожигания показано на рис. 3.2, а. В цепи источника питания протекает ток

$$i = \frac{U_0}{r_0} e^{-t/(r_0 C)} \quad (3.4)$$

**В месте пробоя протекает ток**

$$i_{пр} = \frac{U_{пр}}{r_{п}} e^{-t/(r_{п} C)} \quad (3.5)$$

В начальный период прожигания напряжение пробоя мало отличается от ЭДС источника. Пусть для определенности  $U_{пр} = 0,99U_0$ . Тогда согласно уравнению напряжение, приложенное к изоляции, достигает напряжения пробоя разрядного канала через время  $t^* = 5 r_0 C$ .

За один цикл заряда источник расходует энергию

$$W_{ист} = \int_0^{t^*} U_0 i dt = \frac{U_0^2}{r_0} \int_0^{t^*} e^{-t/(r_0 C)} dt = U_0^2 C \approx U_{пр}^2 C \quad (3.6)$$

Часть ее преобразуется в тепло, выделяющееся во внутреннем сопротивлении источника:

$$W_{п} = \int_0^{t^*} r_0 i^2 dt = \frac{U_0^2 C}{2} \approx \frac{U_{пр}^2 C}{2} \quad (3.7)$$



а часть расходуется на заряд емкости кабеля

$$W_{\Pi} = W_{\text{ист}} - W_{\Pi} = U_{\text{пр}}^2 C - \frac{U_{\text{пр}}^2 C}{2} = \frac{U_{\text{пр}}^2 C}{2} \quad (3.8)$$

Из последнего выражения следует, что независимо от сопротивления источника обе указанные части энергии равны друг другу. Энергия, запасенная при заряде, в процессе разряда переходит в тепло практически за время  $t' \ll 5r_{\Pi}C$ . Действительно, с учетом значения  $i_{\text{пр}}$

$$W_{\Pi} = \int_0^{t'} r_{\Pi} i_{\text{пр}}^2 dt = \frac{U_{\text{пр}}^2 C}{2} = W_3 \quad (3.9)$$

Таким образом, при безындукционном источнике на начальном этапе процесса прожигания полезно используется не более половины энергии источника, т. е. КПД ( $\square$ ) составляет около 50 %.

Аналогично при  $U_{\text{пр}} = 0,9U_0$  получаем  $t' = 2,2r_0C$  и  $\square = 44,4$  %. Период повторения разрядов на начальном этапе прожигания определяется внутренним сопротивлением источника и емкостью кабеля и составляет  $(3 \dots 5)r_0C$ . Время разряда во много раз меньше периода повторения.

Отношение времени заряда ко времени разряда называют скважностью, которая определяется как

$$\lambda = r_0 / r_{\Pi} \quad (3.10)$$

Если принять  $r_{\Pi} = 30$  Ом, то для установки с внутренним сопротивлением  $r_0 = 300$  кОм скважность  $\square = 10^4$ , т. е. лишь в одну десятитысячную часть времени процесса прожигания происходит выделение энергии в месте пробоя. Иными словами, в этих условиях активная часть процесса составляет примерно 1 с за 3 ч прожигания.

В процессе повторения пробоев происходит постепенное обугливание разрядного канала и прилегающих к нему участков изоляции. Это приводит к снижению разрядного напряжения. При том же самом источнике прожигания увеличивается частота пробоев (рис. 3.2, б). Пусть  $U_{\text{пр}} = 0,43U_0$ , тогда время  $t' = r_0C$  и частота пробоев увеличивается в 3-4 раза. Обугливание стенок разрядного канала приводит также к снижению его сопротивления, которое становится сравнимым с внутренним сопротивлением источника, и начальный этап прожигания уже переходит в промежуточный (рис. 3.1, б).

Напряжение на разряднике:

$$u = \frac{U_0}{1 + r_0 / r_{\text{ш}}} \left( 1 - e^{-t / r_{\text{ш}} C} \right) \quad (3.11)$$

Пока  $r_{\text{ш}} \ll r_0$ , процесс прожигания мало отличается от описанного выше. Когда шунтирующее разрядный канал сопротивление становится сравнимым с  $r_0$ , следует считаться с двумя явлениями. С одной стороны, протекание тока через стенки разрядного канала сопровождается выделением существенной части энергии, идущей на дальнейшее обугливание изоляции. С другой стороны, максимальное напряжение на разрядном канале снижается и при том же источнике может оказаться ниже разрядного напряжения. В самом деле, например, при  $r_{\text{ш}} = 0,2r_0$  напряжение на разрядном канале снижается в 6 раз.

В этих условиях КПД прожигания начинает существенно снижаться. При отсутствии разрядов в установившемся режиме КПД составит

$$\eta = r_{\text{ш}} / (r_0 + r_{\text{ш}}) \quad (3.12)$$

В случае  $r_{\text{ш}} = 0,2r_0$  значение  $\square = 16,6$  %. Единственным способом повышения эффективности прожигания является уменьшение внутреннего сопротивления источника, т. е. замена источника прожигания. При  $r_{\text{ш}} = r_0$  значение  $\square = 50$  %. Кроме того, максимальное напряжение на разрядном канале увеличивается до  $U_0/2$ . Если

это значение оказывается выше напряжения пробоя канала, то возникают разряды, а следовательно, КПД прожига дополнительно возрастает.

Из изложенного вытекает необходимость изменения параметров источника прожигания в процессе самого прожигания, поскольку выполнение источника высокого напряжения с малым внутренним сопротивлением затруднено ввиду весьма большой массы такого источника. Практически после снижения напряжения разряда, обеспеченного установкой высокого напряжения с большим внутренним сопротивлением, следует подключить другой источник с меньшим напряжением и соответственно меньшим внутренним сопротивлением. При этом возрастает КПД прожигания и уменьшается скважность разрядов, т. е. процесс прожигания ускоряется.

Дальнейшее разрушение изоляции при прожигании приводит к прекращению разрядов и образованию в месте повреждения относительно устойчивого проводящего мостика. Схема замещения этого заключительного этапа прожигания показана на рис. 3.1, в. Проанализировав этот этап аналогично предыдущему, получим

$$\eta = r_{п,м} / (r_0 + r_{п,м}). \quad (3.13)$$

Зависимость графически представлена на рис. 3.3.

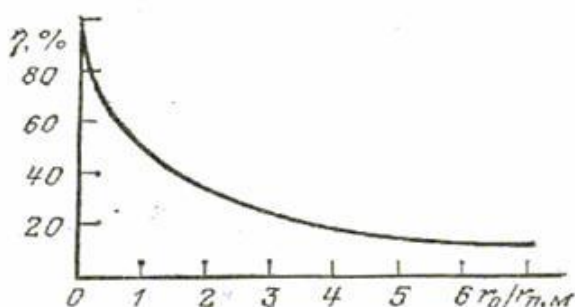


Рис. 3.3. Зависимость КПД прожигания от относительной проводимости разрядного канала

*Идеальный источник* с последовательно включенной индуктивностью. Для увеличения эффективности прожигания на постоянном токе предложено включать дроссель между источником постоянного напряжения  $U_0$  и поврежденным кабелем. Схема прожигания для рассматриваемого случая показана на рис. 3.4.

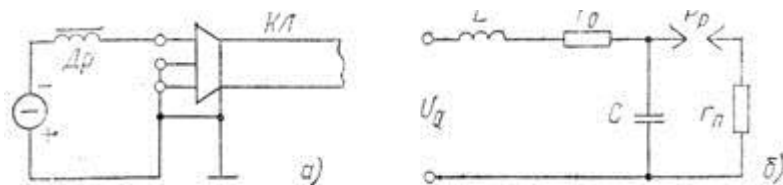


Рис. 3.4. Схемы прожигания изоляции от идеального источника с последовательно включенным дросселем:

а — исходная схема; б — схема замещения

При включении такой схемы могут возникнуть три режима: колебательный ( $r_0 < 2 \sqrt{L/C}$ ); критический ( $r_0 = 2 \sqrt{L/C}$ ); аperiодический ( $r_0 > 2 \sqrt{L/C}$ ). Характер изменения токов и напряжений в схеме показан на рис. 3.5.

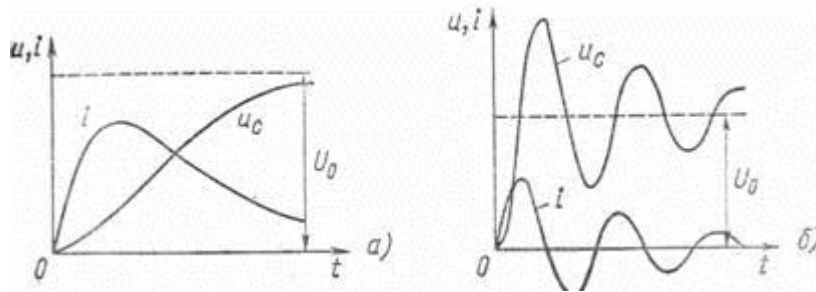


Рис.3.5. Изменение напряжения на кабеле и тока в контуре

в схеме рис. 34: а –  $\beta > \beta_0$ ; б –  $\beta < \beta_0$ .

Наиболее эффективен для прожигания колебательный режим, так как в этом случае (рис. 3.5, б) напряжение на кабеле может достигать двойного напряжения источника, причем напряжение изменяется с частотой  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ , с этой же частотой изменяется и ток в контуре

$$u_c = U_0 \left[ 1 - \frac{\omega_0}{\omega} \cos(\omega t - \alpha) e^{-\beta t} \right], \quad (3.14)$$

$$i = \frac{U_0}{\omega L} \sin \omega t e^{-\beta t}, \quad (3.15)$$

где  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  – собственная частота контура;  $\beta = r_0/2L$  – декремент затухания;  $\alpha = \arcsin \beta/\omega_0$ . Потери в таком контуре:

$$W_{\pi} = \int_0^t r_0 i^2 dt = \frac{U_0^2 r_0}{(\omega L)^2} \int_0^t e^{-2\beta t} \sin^2 \omega t dt, \quad (3.16)$$

а энергия прожигания принимается равной энергии, запасаемой емкостью,

$$W_{\pi p} = \frac{U_c^2 C}{2} = \frac{U_0^2 C}{2} \left[ 1 - \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\beta t} \cos(\omega t - \alpha) \right]^2. \quad (3.17)$$

Выражение для КПД прожигания можно представить в следующем виде:

$$\eta = W_{\pi p} / (W_{\pi p} + W_{\pi}) = 1 / (1 + W_{\pi}^*), \quad (3.18)$$

где

$$W_{\pi}^* = \frac{W_{\pi}}{W_{\pi p}} = \frac{\cos^2 \alpha - [1 - \sin \alpha \sin(2\omega t - \alpha)] e^{-2\beta t}}{\cos^2 \alpha \left[ 1 - \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\beta t} \cos(\omega t - \alpha) \right]^2}. \quad (3.19)$$

Напряжение на кабеле достигает наибольшего значения к моменту  $t_m = \alpha/\omega$ , тогда выражение после преобразований будет иметь вид

$$W_{\pi^*} = \frac{1 - e^{-2\beta(\pi+\alpha)/\omega}}{1 + \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\beta(\pi+\alpha)/\omega}} \quad (3.20)$$

Для реальных установок добротность контура (рис.3.4, б)  
 $Q_0 = \omega_0 L / r_0 \gg 5$ . В этом случае  $\alpha < 6^\circ$ , а  $W_{\pi^*} \approx 0,177$ . Соответственно КПД прожигания  $\approx 84\%$ .

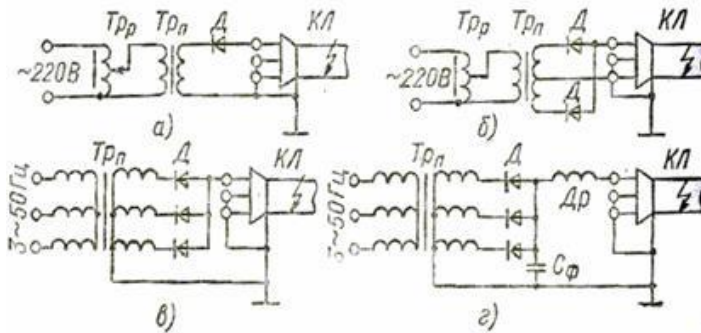


Рис. 3.6. Принципиальные схемы прожигания изоляции с помощью выпрямительных установок: а – однополупериодное выпрямление; б – двухполупериодное выпрямление; в – трехфазное выпрямление; г – трехфазное выпрямление с последовательно включенным дросселем

С повышением добротности контура до десяти КПД увеличивается до 92 % (при отсутствии дросселя максимальный КПД не превышает 50 %). Разряды будут следовать через время  $t_m \approx 1/(2f)$ . Если частота колебаний  $f = 50$  Гц, то  $t_m \approx 0,01$  с, т. е. прожигание будет эффективным.

Принципиальная схема прожигания изоляции с помощью выпрямительных установок показана на рис. 3.6. При прожигании дефектной изоляции кабелей от выпрямительных установок необходимо учитывать индуктивность рассеяния питающего трансформатора.

### 3.3. Прожигание изоляции на переменном напряжении

Нерезонансное прожигание (рис. 3.7) производится с помощью повышающего трансформатора, вторичная обмотка которого присоединяется непосредственно к поврежденной жиле и оболочке (или другой поврежденной жиле), а первичная – к сети промышленной частоты.

На рис. 3.7: Трп – трансформатор повышающий;  $L$  и  $r_0$  – индуктивность рассеяния и активное сопротивление трансформатора Трп, приведенные ко вторичной обмотке;  $C$  – емкость КЛ;  $r_n$  – переходное сопротивление разрядного канала;  $L_K$  и  $r_K$  – индуктивность и активное сопротивление кабеля;  $r_{п,м}$  – сопротивление проводящего мостика в месте дефекта.

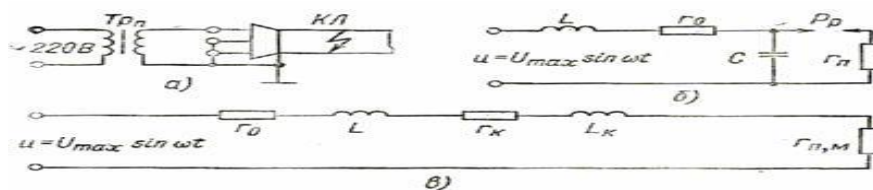


Рис. 3.7. Схемы нерезонансного прожигания:

а – принципиальная; б – замещения для начального и; в – заключительного этапов

Амплитуда напряжения на кабеле (разряднике  $Pp$ )

$$U_{C, \max} = \frac{I_{\max}}{\omega C} = \frac{U_{\max}}{\omega C \sqrt{r_0^2 + [\omega L - 1/(\omega C)]^2}}, \quad (3.21)$$

где  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота;  $I_{\max}$  — амплитуда тока в  $LCr_0$ -контуре (рис. 3.7, б).

Значительная удельная ёмкость силовых кабелей приводит к необходимости потреблять большие токи  $I_{\max}$  для обеспечения достаточного напряжения  $U_{c, \max}$ .

Так, трансформатор напряжением  $U_{\max} = 50$  кВ при  $L = 200$  Гн и  $r_0 = 10$  кОм обеспечит на трехжильном кабеле 6 кВ сечением  $70 \text{ мм}^2$  и длиной 3 км напряжение  $U_{c, \max} = 2,66$  кВ, что составляет лишь 5,3 % напряжения источника при потреблении мощности 20 кВ·А.

Для кабелей длиной более 0,5 км нерезонансное прожигание на начальном этапе совершенно непригодно. Для коротких кабелей оно может быть оправдано лишь при отсутствии выпрямителей. От того же трансформатора, что и в предыдущем примере, на кабеле того же типа, но длиной 0,4 км можно обеспечить около 50 % напряжения источника при потреблении 27 кВ·А.

Практически при прожигании на переменном токе сначала медленно с помощью регулировочных устройств поднимают напряжение на первичной обмотке прожигающего трансформатора. Поэтому до первого пробоя напряжение на разрядном канале можно рассматривать как установившееся. Первый пробой происходит в момент, соответствующий приближению напряжения на разрядном канале к максимальному. Разряд по характеру и длительности соответствует рассмотренному выше случаю при анализе схемы рис. 3.1.

Повторные процессы заряда емкости кабеля после быстрых разрядов происходят аналогично процессу включения  $rLC$ -цепи на синусоидальное напряжение.

На принужденную синусоидальную составляющую напряжения с частотой  $\omega$  накладываются еще две свободные составляющие. В случае  $r_0 \gg 2\omega L/C$  они имеют апериодический характер с разными постоянными времени. При  $r_0 < 2\omega L/C$  колебательные составляющие с частотой  $\omega_0 = \omega \sqrt{1/LC - r_0^2/4L^2}$  сдвинуты между собой по фазе на некоторый угол  $\phi$ , но затухают с одинаковой постоянной времени.

Максимальное напряжение на разрядном канале зависит от момента включения (момента предыдущего пробоя) и соотношения между частотами  $\omega$  и  $\omega_0$ .

В тех случаях когда  $\omega \gg \omega_0$ , возникают перенапряжения и вероятность пробоя разрядного промежутка увеличивается.

Снижение частоты  $\omega_0$  при прочих равных условиях увеличивает скважность разрядов. Если к этому добавить практическую невозможность обеспечения стабильного значения угла  $\phi$ , соответствующего значительным перенапряжениям, то становится очевидной нецелесообразность нерезонансного прожигания на начальном этапе повреждения изоляции.

На заключительной стадии процесса прожигания (рис. 3.7, в), когда поврежденный участок изоляции представляет собой проводящий мостик, условия для прожигания на переменном токе улучшаются. При этом удовлетворяется соотношение

$$r_{\text{п,м}} \ll 1/(\omega C) \quad (3.22)$$

Коэффициент полезного действия при прожигании можно считать равным отношению активной мощности  $P_{\text{п,м}}$ , выделяемой в месте повреждения, к суммарной активной мощности  $P_{\Sigma}$  источника

$$\eta = \frac{P_{\text{п,м}}}{P_{\Sigma}} = \frac{I^2 r_{\text{п,м}}}{I^2 r_{\Sigma}} = \frac{r_{\text{п,м}}}{r_0 + r_K + r_{\text{п,м}}} \quad (3.23)$$

Обычно удается обеспечить  $\eta = 20 \dots 40$  %. Условие  $r_{\text{п,м}} \ll 1/(\omega C)$  для кабелей длиной более 0,3 км выполняется при  $r_{\text{п,м}} < 100$  Ом, а для кабелей длиной более 2 км — при  $r_{\text{п,м}} < 15$  Ом.

Нерезонансное прожигание целесообразно использовать только на последнем этапе прожигания изоляции КЛ ограниченной протяженности.

*Резонансное прожигание на промышленной частоте.* Использование явления резонанса на промышленной частоте для прожигания дефектной изоляции кабелей было предложено в [3]. В нашей стране этот способ начал применяться с 1960 г. [4]. При резонансном способе прожигания емкостное сопротивление кабеля компенсируется внешним индуктивным сопротивлением, что позволяет значительно снизить мощность источника, а при последовательном включении индуктивности – значение питающего напряжения. При работе резонансных установок по мере снижения переходного сопротивления в месте повреждения происходят шунтирование емкости кабеля и частичное расстройство резонансного контура, в результате чего напряжение на кабеле уменьшается. Когда возникает устойчивый проводящий мостик, то резонансный контур полностью расстраивается. При этом ток через место повреждения резко уменьшается, а возникающий проводящий мостик не разрушается.

Максимальное резонансное напряжение не должно превышать испытательного переменного напряжения, например 16... 25 кВ, применяемого на кабельных заводах для испытания изоляции силовых кабелей с рабочим напряжением 6...10 кВ соответственно.

Резонансные установки, используемые для прожигания дефектной изоляции кабелей, можно разделить на две характерные группы: резонансные трансформаторы и установки с регулируемыми дросселями. Резонансные трансформаторы могут работать в режимах резонанса токов и резонанса напряжений. Установки с регулируемыми дросселями также работают в первом или втором из названных режимов, но при последовательном или параллельном подключении дросселя к прожигаемому кабелю. Ниже будет рассмотрена работа в этих режимах.

Способ резонанса напряжений. Полная схема замещения установки для прожигания, работающей в данном режиме, приведена на рис. 3.8, а. На схемах рис. 3.8 указаны:  $r_m$  – активное сопротивление дросселя;  $L$  – индуктивность дросселя,  $r_{ст}$  – активное сопротивление, учитывающее потери в стали дросселя;  $C$  – емкость КЛ (и балластного конденсатора);  $r_k$  – активное сопротивление, учитывающее потери в поврежденном кабеле;  $r_n$  – переходное сопротивление в месте повреждения в момент разряда;  $B$  – ключ, замыкающийся при  $u_c = U_{пр}$  (имитирует пробой);  $u$  – синусоидальное напряжение на зажимах вторичной обмотки питающего трансформатора;  $U$  – действующее значение того же напряжения.

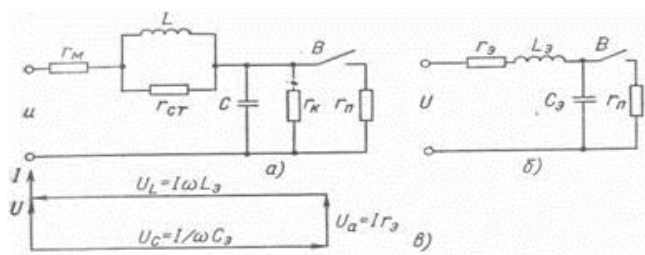


Рис. 3.8. Схемы замещения и векторная диаграмма для установки, работающей в режиме резонанса напряжений:

а, б – схемы замещения; в – векторная диаграмма

Полная разветвленная схема замещения (рис. 3.8, а) приведена к последовательной эквивалентной схеме (рис. 2.28, б) со следующими параметрами:

$$r_3 = r_k / \left[ 1 + (r_k \omega C)^2 \right] + r_m + \frac{r_{ст}}{(r_{ст} / \omega L)^2 + 1}; \quad (3.24)$$

$$C_3 = C \left[ 1 + 1 / (r_k \omega C)^2 \right]; \quad (3.25)$$

$$L_3 = \frac{1}{(\omega L / r_{ст})^2 + 1}. \quad (3.26)$$

Тогда напряжение на кабеле

$$U_c = \frac{I}{\omega C_3} = \frac{U}{\omega C_3 \sqrt{r_3^2 + (\omega L_3 - 1/\omega C_3)^2}} \quad (3.27)$$

В условиях резонанса собственная частота контура равна частоте питающего напряжения, т. е.

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_3 C_3} = \omega \quad (3.28)$$

При этом  $\omega L_3 = 1/(\omega C_3)$  и ток в цепи увеличивается до  $I = U/r_3$ . Векторная диаграмма при резонансе напряжений дана на рис. 3.8, в.

Если воспользоваться понятиями характеристического сопротивления  $\rho = \omega L_3/C_3 = 1/\omega C_3 = \omega L_3$  и добротности  $Q = \rho/r_3$  контура, то можно записать

$$U_c = \frac{\rho}{r_3} U = QU \quad (3.29)$$

Реактивная и активная мощности в контуре связаны через добротность

$$P_p = QPa$$

т. е. добротность является одним из основных параметров, определяющих работу резонансной установки.

Как показано:

$$Q \approx \frac{1}{r_m/\rho + \rho/(r_{сТ}) + tg\delta + \rho/r_{ш}} \quad (3.30)$$

где  $r_{ш}$  – шунтирующее сопротивление стенок разрядного канала (должно быть включено в схеме рис. 3.9, а параллельно сопротивлению  $r_k$ ).

На рис. 3.9 показаны зависимости добротности всего контура прожигания от емкости кабеля  $C$  и сопротивления  $r_{ш}$  (отношения  $r_{ш}/\rho$ ) при собственной добротности дросселя  $Q_d = 25$ . При изменении отношения  $r_{ш}/\rho$  от 10 до 1 добротность контура уменьшается почти в 10 раз и резонансное прожигание переходит в прямое дожигание от источника, питающего резонансный контур. Однако при шунтирующих сопротивлениях  $r_{ш} = \rho$  мощность, выделяемая в канале, оказывается недостаточной. Указанным обстоятельством можно объяснить малое распространение резонансных устройств за рубежом.

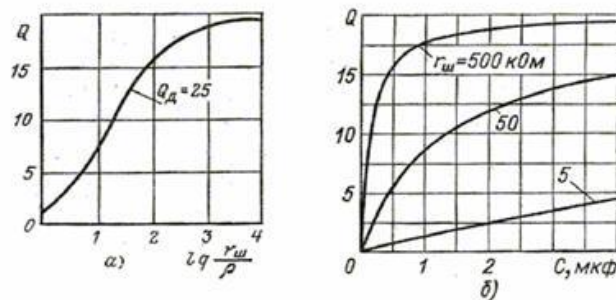


Рис. 3.9. Зависимости добротности резонансного контура от шунтирующего сопротивления (а) и емкости кабеля (б)

На рис. 3.10 показаны кривые изменения напряжения на кабеле в различных режимах работы резонансной установки.

*Способ резонанса токов.* Полная схема замещения установки, работающей в режиме резонанса токов, дана на рис. 3.11, а, где приняты такие же обозначения, как и на рис. 3.8, а. Для резонансного трансформатора, работающего в режиме резонанса токов,  $L = L_{S2} + L_m$  – индуктивность, обусловленная

потоком рассеяния вторичной обмотки и потоком взаимной индукции;  $u = u_m$  – напряжение, создаваемое во вторичной обмотке потоком взаимной индукции. Полную разветвленную схему замещения (рис. 3.11, а) приведем к параллельной эквивалентной (рис. 3.11, б). Эквивалентное сопротивление  $r_3'$ , учитывающее потери в параллельном резонансном контуре, определяется как

$$r_3' = \frac{1}{1/r_{CT} + 1/r_M' + 1/r_K + 1/r_{ш}}, \quad (3.31)$$

где

$$r_M' = (\omega L)^2 / r_M,$$

$r_K$  – составляющая, зависящая от активных потерь в изоляции;  $r_{ш}$  – активное сопротивление, шунтирующее разрядный канал.

Для параллельного резонансного контура напряжение на емкости равно напряжению источника питания. При этом емкостный ток  $I_c = Ub_c$  превышает полный ток трансформатора:

$$I = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}, \quad (3.32)$$

где  $g = 1/r_3$ ;  $b_L = 1/\omega L$ ;  $b_C = 1/\omega C$  – соответственно активная, индуктивная и емкостная проводимости контура.

Как показано ранее, выражение для добротности в случае резонанса токов совпадает с выражением для последовательного контура. Энергетические и временные соотношения при резонансе токов также аналогичны соотношениям при резонансе напряжений. Хотя схемы одинаковы с точки зрения процесса прожигания, режимы работы питающих их трансформаторов существенно отличаются. При резонансе напряжений с пробоем изоляции трансформатор переходит из режима нормальной нагрузки в режим х.х. При резонансе токов с пробоем изоляции трансформатор переходит в режим КЗ, который постепенно возвращается в нормальный режим (по мере раскачки контура). Это существенно снижает КПД резонансной установки, работающей в режиме резонанса токов.

*Сравнительная оценка систем прожигания.* Как отмечалось выше, для обеспечения необходимого переходного сопротивления в месте повреждения кабеля используются различные системы прожигания. Под системой прожигания подразумеваются не отдельные устройства, а совокупность методов и средств, обеспечивающих конечный результат прожигания (от одиночных разрядов до устойчивого проводящего металлического спая).

Приведенные выше соотношения позволяют объективно оценить любые из рассмотренных систем прожигания, провести количественную оценку различных вариантов и выбрать наиболее эффективный. Необходимо отметить, что КПД прожигания не только отражает степень использования потребляемой из сети электроэнергии (это в целом ряде случаев несущественно), но, в первую очередь, показывает, какая часть энергии выделяется в месте повреждения и какая – в самой установке. Последняя же составляющая энергии определяет массу и размеры установки. Мощность прожигания прежде всего характеризует скорость процесса, т. е. определяет производительность труда при выявлении мест повреждения.



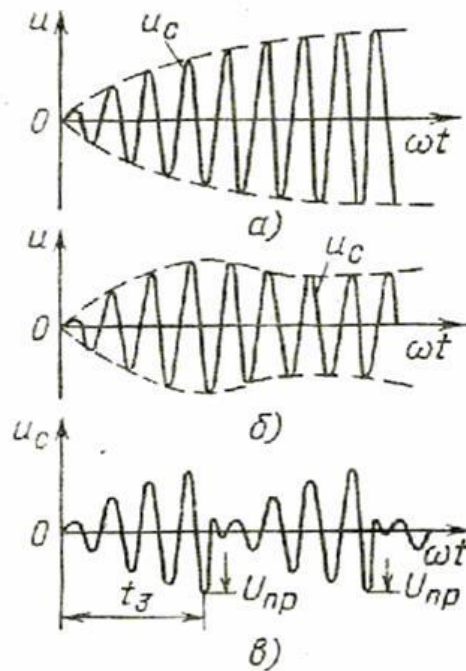


Рис. 3.10. Кривые изменения напряжения на кабеле при резонансном прожигании: а – включение при точной настройке и б – при расстройке контура: в – режим прожигания

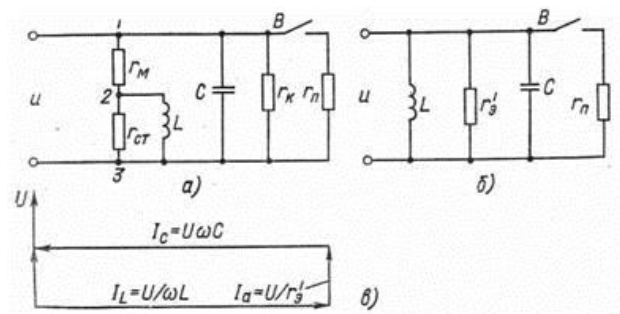


Рис. 3.11. Схемы замещения и векторная диаграмма для установки, работающей в режиме резонанса токов:

а, б – схемы замещения; в – векторная диаграмма

Наиболее эффективно прожигание от идеального источника постоянного напряжения с последовательно включенной индуктивностью. Здесь в широком диапазоне пробивных напряжений обеспечивается высокий КПД прожигания. В реальных условиях роль идеального источника постоянного напряжения играет мощный емкостный накопитель энергии с трехфазной выпрямительной установкой.

Из-за более длительного накопления энергии в дросселе установки постоянного тока с индуктивным накопителем энергии менее ее эффективны, так как для них также требуется коммутационная аппаратура, рассчитанная на полное напряжение прожигающей установки.

Худшие показатели реальных установок выпрямленного напряжения (особенно однополупериодных) обусловлены тем, что накопление энергии происходит путем заряда емкости кабеля импульсами тока в проводящие части периодов.

Устройства переменного тока, в том числе и резонансные, эффективны только при сниженных значениях относительного пробивного напряжения. В этих условиях они могут конкурировать с однополупериодными выпрямительными установками.

Опыт эксплуатации убедительно подтверждает приведенные выше теоретические выводы. Наибольший эффект дают прожига-тельные установки, использующие трехфазное, а также двухполупериодное выпрямление. Установки со специальной последовательно включенной на выходе катушкой индуктивности, предложенные в [5], пока серийно не выпускаются. Роль катушки индуктивности в определенной степени

играет индуктивность рассеяния трансформатора выпрямителя. Это относится к мощному источнику без специальной батареи накопительных конденсаторов.

Прожигание на постоянном токе применяют как в России, так и за рубежом. В России результаты использования резонансных установок хуже, чем трехфазных и двухполупериодных выпрямительных устройств.

Опыт применения установок с индуктивным накопителем еще мал. Задачей ближайшего будущего является выпуск серийных устройств постоянного тока с трехфазным выпрямителем и последовательным дросселем.

### 3.4. Режимы и приемы прожигания

*Допустимые напряжения при прожигании бумажно-масляной изоляции.* Для правильного выбора максимальных напряжений и режимов прожигания большое значение имеют возможные перенапряжения на неповрежденной изоляции. Электрическая прочность исправных кабелей с бумажно-масляной изоляцией во много раз превышает рабочее напряжение.

Начальная ионизация в слабонервномерном электрическом поле для бумажно-масляной изоляции возникает при напряженности  $E_n = 12$  кВ/мм в случае напряжения переменного тока и  $E_n = 40...60$  кВ/мм при напряжении постоянного тока. Начальная ионизация даже на переменном токе (100 всплесков в секунду) не будет опасной, и изоляция с такой ионизацией может работать тысячи часов. В случае постоянного тока постоянная времени начальной ионизации – около сотен секунд, т. е. в тысячи раз менее интенсивна. Критическая ионизация, воздействие которой даже в течение долей секунды снижает напряжение начальной ионизации, а за несколько секунд может привести к пробое, в случае напряжения переменного тока возникает при  $E_{кр} = 30$  кВ/мм.

Применяемые в современных условиях уровни испытательных напряжений для кабелей 6 кВ составляют 40...50 кВ напряжения постоянного тока и 16 кВ напряжения переменного тока. Размеры изоляции (2,95 мм для кабелей 6 кВ) приводят к напряженностям, в 2...3 раза меньшим, чем соответствующие начальной ионизации в исправной изоляции. Ниже приведены значения напряжений, которые могут вызвать начальную ионизацию для исправных кабелей различных номинальных напряжений:

Номинальное напряжение кабеля, кВ	1	6	10
Переменное испытательное напряжение, кВ	15	35	48
Постоянное испытательное напряжение, кВ	48	118	160

Превышение испытательных напряжений вдвое еще не приводит к начальной ионизации. Если к этому добавить, что напряжение критической ионизации на переменном токе в 2,5 раза выше, чем начальной, то можно сделать следующий важный вывод: при напряжениях, которые практически могут возникнуть в процессе прожигания, нельзя повредить исправную изоляцию кабеля. По-иному обстоит дело с концевыми разделками кабельных линий. Например, исправная концевая разделка кабельной линии 6 кВ может быть перекрыта по поверхности при выпрямленном напряжении 60...80 кВ. Кроме того, на кабельной линии в момент прожигания одного дефектного места может возникнуть и другое, электрическая прочность которого лишь на несколько киловольт выше испытательного напряжения.

Одновременное отыскание двух и более мест повреждения значительно сложнее, чем раздельное. Поэтому целесообразно ограничить максимально допустимое напряжение при прожигании величиной выпрямленного напряжения

$$U_{\max} \leq (1,05...1,1) U_{\text{исп}}, \quad (3.33)$$

где  $U_{\text{исп}}$  – испытательное напряжение.

Точное определение соответствующего этой величине переменного напряжения затруднительно. Однако ориентировочно можно принять

$$U_{\max} \sim U_{\max} / \sqrt{2} k, \quad (3.34)$$

где  $k$  – коэффициент запаса, учитывающий большую интенсивность ионизации в случае переменного напряжения.

При выборе значения  $k$  надо иметь в виду следующее. Во время прожигания от источника выпрямленного напряжения к изоляции в период заряда практически прикладывается не постоянное, а сравнительно медленно изменяющееся монополярное переменное напряжение. Поскольку постоянная времени заряда составляет  $0,05 \dots 1$  с, то эквивалентная этому процессу частота – от единиц до десятка герц. Во время разряда фактически прикладывается также переменное напряжение в виде затухающих колебаний частотой от  $20$  кГц до  $1$  МГц длительностью в несколько периодов этих колебаний. При прожигании от источника переменного напряжения процесс разряда идентичен указанному выше, а частота заряда –  $50$  Гц.

Вблизи напряжения начальной ионизации повышение ее интенсивности на порядок соответствует повышению напряжения на несколько киловольт. Поэтому ориентировочно примем  $k = 1,3 \dots 1,4$ . Тогда для кабелей  $6$  кВ получим:

$$U_{\max} = 35 \cdot 1,1 / \sqrt{2} \cdot 1,4 = 19 \text{ кВ.}$$

Это значение примерно вдвое ниже напряжения начальной ионизации и, следовательно, безопасно для неповрежденной изоляции. Превышение отмеченных выше уровней напряжений при прожигании можно исключить за счет рационального конструирования прожигательных установок и правильного выбора режимов прожигания.

На рис. 3.12 показана схема замещения для начального этапа прожигания с питанием от источника постоянного напряжения. Рассмотрим, при каких условиях на емкости кабеля (конденсаторе  $C$ ) могут возникнуть напряжения, превышающие  $U_0$ . Одним из таких условий являются колебания  $r_0 LC$  – контура. Колебания возникают, если  $r_0 < 2 \sqrt{L/C}$ .

Колебания контура можно ориентировочно представить также в виде  $r_0 \approx (14 \dots 100)$  кОм. В реальных условиях это соотношение довольно часто выполняется. Следовательно, при заряде напряжение на изоляции может составить  $(1,5 \dots 1,75)U_0$ . Поэтому испытание изоляции, а иногда и определенную часть начального этапа процесса прожигания целесообразно вести при включенном последовательно с источником резисторе  $r_{\text{доб}}$ , сопротивление которого (десятки кОм) должно удовлетворять условию

$$r_0 + r_{\text{доб}} \geq 2\sqrt{L/C}. \quad (3.35)$$

После снижения пробивного напряжения до  $U_0(1,4 \dots 1,6)$  резистор  $r_{\text{доб}}$  следует закоротить.

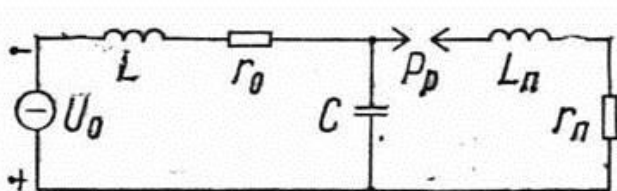


Рис. 3.12. Схема замещения для анализа перенапряжений в процессе прожигания

Другой причиной повышения напряжения на изоляции может быть погасание дуги в месте пробоя при значительном положительном напряжении на конденсаторе колебательного разрядного  $CL_{\text{п}}r_{\text{п}}$  – контура. Как показывают испытания и многолетний опыт эксплуатации, дуга в месте пробоя гаснет, как правило, в момент приближения к нулевому значению напряжения на кабеле, т. е. при пробое происходит полный разряд. Но при «заплывающих» пробоях иногда, а не часто, как указано, например, в [6], могут возникнуть специфические условия. Они заключаются в том, что дуга гаснет при значительном положительном напряжении  $U_{\text{ост}}$  на разрядном промежутке, а следовательно, и на конденсаторе  $C$ . В повторном процессе (если он имеет колебательный характер) кабель зарядится до еще большего отрицательного напряжения:  $-U_0 - (+U_{\text{ост}})$ . Если пробивное напряжение разрядного промежутка также возрастает, а погасание дуги вновь произойдет в положительный полупериод собственных колебаний разрядного контура, то возможно дальнейшее повышение напряжения на изоляции.

В подавляющем большинстве случаев сам разрядный промежуток исключает повышение напряжения, являясь как бы ограничивающим разрядником.

Изложенное выше позволяет сделать следующие выводы:

1. В качестве выпрямительной установки для первой части начального процесса прожигания следует использовать испытательные установки с добавочным резистором сопротивлением в несколько десятков кОм.

2. Максимальное напряжение прожигательных выпрямительных установок должно быть не выше  $0,5 \dots 0,7 U_{\text{исп}}$ .

3. Длительное прожигание (более 20...30 мин), не сопровождающееся существенным снижением пробивного напряжения, производить не следует.

При прожигании с помощью резонансных установок любых типов максимальное напряжение на кабельной изоляции превышает напряжение на вторичной обмотке трансформатора в  $Q$  раз ( $Q$  – добротность резонансного контура). Следовательно, амплитуда выходного напряжения трансформатора резонансной установки должна удовлетворять условию

$$U_T \leq U_{\text{max}} / Q \approx U_{\text{max}} / (\sqrt{2} \cdot 1,4 Q) = \frac{U_{\text{исп}}}{2Q} \quad (3.36)$$

**Приемы прожигания.** Обобщение опыта работы инженеров и мастеров, специализирующихся на прожигании изоляции КЛ с целью определения места повреждения, подкрепленное детальным анализом процесса прожигания, позволяет рекомендовать ряд прогрессивных приемов ведения этого процесса.

*Чередование ступеней прожигания.* В процессе прожигания необходимо по мере снижения напряжения пробоя переходить на следующую ступень прожигания. Как только по параметрам установки представляется возможность включить на параллельную работу (или отдельно) более мощную ступень, это надо немедленно выполнять. Под более мощной ступенью понимается установка с меньшим внутренним сопротивлением и большим током.

Очень часто переход на более мощную ступень прожигания приводит сначала к «заплыванию», т. е. к подъему пробивного напряжения. При этом следует вернуться к предыдущей ступени более высокого напряжения, а затем после снижения напряжения пробоя переходить на следующую ступень.

«Задерживаться» на какой-либо ступени нецелесообразно. Дело в том, что «заплывание», т.е. притекание в разрядный канал пропитки из соседней с каналом области изоляции, ограничено, а прожигание до малых сопротивлений без захвата и осушения определенного объема прилегающей изоляции невозможно. При неизменных порциях энергии, подаваемой в разрядный канал, процесс захвата соседних участков изоляции протекает медленнее, чем при чередовании ступеней.

Рекомендуется на промежуточном этапе прожигания создавать последовательно с разрядным каналом дугу на штанговом переключателе установки. Для этого необходимо изолированной от высокого напряжения штангой при включенной установке медленно размыкать выключатель, слегка изменяя расстояние между подвижным и неподвижным контактами, но не допуская погасания дуги.

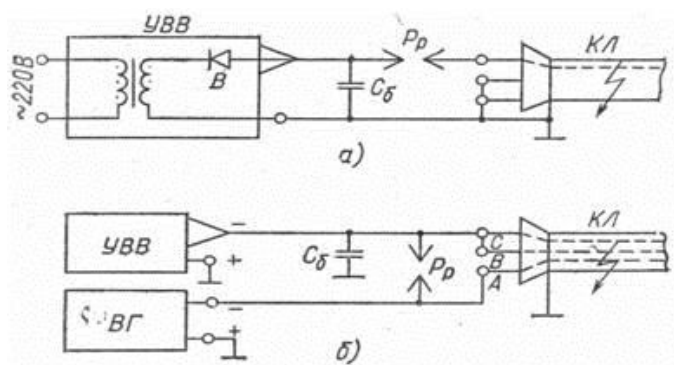


Рис.3.13. Принципиальные схемы прожигания: *а* – для разрушения металлического спая; *б* – для перевода однофазного замыкания в двухфазное; УВВ – выпрямительная высоковольтная установка; *В* – выпрямитель;  $P_p$  – разрядник;  $C_6$  – балластный конденсатор; ВГ – газотронный выпрямитель

*Разрушение металлического спая.* Если на КЛ было замыкание на землю, т. е. через место повреждения достаточно длительно протекал ток 10 А и более, то в этом месте образуется металлический спай между жилой и оболочкой. При некоторых методах определения места повреждения (например, акустическом) необходимо этот спай разрушить. Во многих случаях, хотя далеко не всегда, это достигается с помощью устройства, питающегося от выпрямителя В (рис. 3.13, *а*).

Значение емкости конденсатора  $C_6$  должно быть не менее 1...1,5 мкФ, пробивное напряжение разрядника  $P_p$  – около 20...25 кВ. Бросок тока при пробое разрядника в этом случае достигает сотен ампер и под действием динамических усилий спай в кабеле может быть разрушен. Повторение пробоев для разрушения спая следует вести 10...20 мин. Если за это время не удастся добиться желаемого результата, то дальнейшие попытки нецелесообразны.

*Перевод замыкания жилы на оболочку в замыкание между жилами.* Применение индукционного метода дает хорошие результаты при отыскании мест замыкания между жилами трех- или четырехжильного кабеля. Довольно часто в Московской кабельной сети Мосэнерго однофазное замыкание кабеля 6...10 кВ удается перевести в междужильное путем применения методики прожигания, предложенной В. М. Бронштейном. Схема цепи прожигания показана на рис. 3.13, *б*.

В период прожигания изоляции жилы А с помощью выпрямителя ВГ, обеспечивающего напряжение 5...10 кВ и ток 1...3 А, к этой жиле через разрядник  $P_p$  подключают импульсную установку, состоящую из емкости двух неповрежденных жил В и С относительно оболочки, балластного конденсатора  $C_6$  (необязателен) и выпрямителя высокого напряжения УВВ (на полное испытательное напряжение).

Емкость периодически заряжается до напряжения пробоя разрядника  $P_p$ , которое устанавливается равным 20...25 кВ, и импульс тока разряда разрушает образующийся под влиянием тока от выпрямителя ВГ проводящий мостик в разрядном канале. Периодическое создание и разрушение проводящего мостика увеличивает объем разрушения изоляции. Напряжение на других жилах кабеля в переходном режиме увеличивает вероятность перехода пробоя с этих жил на поврежденную. При возникновении пробоя невозможно поднять напряжение от установки УВВ и прекратить срабатывание разрядника. Однофазное замыкание удастся перевести в междужильное не во всех случаях.

*Прожигание изоляции для ОМП акустическим методом.* Для применения акустического метода отыскания МП вида жила – оболочка необходимо ограничивать ток прожигания. При токах через МП более нескольких ампер возможно металлическое спаивание жилы с оболочкой, что исключает применение акустического метода. Разрушение же металлического спая, как отмечено выше, возможно далеко не всегда. Поэтому при использовании акустического метода ОМП последние ступени прожигать не следует. С другой стороны, целесообразно ограничиваться только первой ступенью прожигания, так как с увеличением объема разрушения изоляции увеличивается часть энергии разряда, создающая акустический эффект.

*«Заплывающие» пробои.* Если повторение пробоев в течение десятков минут не приводит к снижению пробивного напряжения, то можно заключить, что пробой происходит в соединительной муфте (гораздо реже подобные явления возникают в концевых муфтах). Сначала необходимо убедиться визуальным осмотром, что нет повреждения концевой разделки (муфты) на противоположном от места подключения установки конце КЛ. После этого следует прекратить прожигание и определять МП комбинацией колебательного и акустического разрядов.

### 3.5. Передвижные установки для прожигания

В настоящее время установки, применяемые в кабельных сетях для ОМП, монтируются на шасси микроавтобусов либо обычных автобусов. Основной объем установок занимают устройства для прожигания дефектной изоляции и создания искрового разряда при акустическом методе ОМП.

В этих же передвижных установках расположены приборы для неавтоматической локации, приборы, использующие метод колебательного разряда, индукционные кабелеискатели и универсальные приемники (для индукционного и акустического поиска), приборы для контактного метода. Установки оснащены специальными барабанами для присоединения к жилам измеряемого кабеля, контуру заземления, питающей сети 380 или 220 В. Имеются также коммутационная и управляющая аппаратура и измерительные приборы контроля режимов испытания и прожигания.

В передвижных установках обеспечиваются условия безопасности с помощью блокировочных контактов, ограждений и других средств. Подавляющее большинство прожигательных устройств обеспечивает прожигание выпрямленным током. При этом обязательно применяется несколько ступеней напряжения и тока. На последних ступенях, т. е. ступенях низкого напряжения, иногда используют переменный ток (нерезонансное прожигание) промышленной или повышенной (около 1000 Гц) частоты.

Широко используется параллельная работа двух ступеней прожигания, когда переход на следующую ступень осуществляется автоматически.

Приведем данные ряда прожигательных установок. Установка для прожигания изоляции кабелей типа BT5000 фирмы Seba dynatronic (ФРГ) имеет шесть ступеней прожигания на выпрямленном токе

Напряжение, кВ	14	8	4	1,2	0,22	0,06
Ток, А	0,5	0,8	1,5	6,0	30,0	110

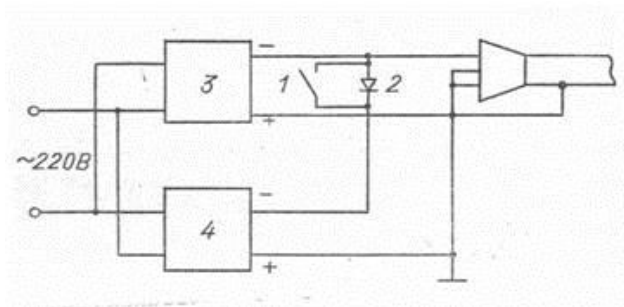


Рис. 3.14. Схема параллельной работы двух прожигательных установок:

1 – выключатель; 2 – диодный столб; 3 – установка HPG70; 4 – установка BT5000

Выходная мощность на каждой ступени – около 7 кВ·А. Установки BT5000 и HPG70 на 70 кВ и ток 0,05 А могут использоваться параллельно по схеме, приведенной на рис. 3.14. Выключатель 1 отключен. Диодный столб 2 выполнен на полное напряжение (70 кВ) установки 3 и на максимальный ток (110 А) установки 4. Этот столб обеспечивает параллельную работу обеих установок. При пробое от высоковольтной установки может происходить автоматический подхват дуги установкой с большим током. Установка BT5000 имеет шесть быстродействующих электромагнитных переключателей ступеней прожигания. При устойчивом режиме прожигания от установки BT5000 включается выключатель.

Фирма Baltou (Бельгия) выпускает прожигающую установку типа EDC6000. Установка имеет четыре ступени прожигания на выпрямленном напряжении 24, 12, 6, 3 кВ и одну ступень прожигания на переменном напряжении 500 В. Длительная мощность прожигания составляет на постоянном токе 6 кВт на каждой ступени и 4,5 кВ·А на переменном токе. Питание установки производится от сети 220 ±22 В. Основным элементом установки является трансформатор с магнитно-шунтовым устройством, обеспечивающим стабилизацию выходного тока на всех ступенях прожигания. Трансформатор имеет девять вторичных обмоток: восемь одинаковых для питания мостового выпрямителя (3 кВ; 0,25 А) и одну (500 В; 9 А) используемую для прожигания на переменном токе. Выходные цепи выпрямителей с помощью переключателя соединяются последовательно, смешанно и параллельно, обеспечивая на выходе установки напряжения 24, 12, 6 и 3 кВ.

Мощность прожигательных установок на выпрямленном напряжении (мало изменяющаяся при переходе от одной ступени к другой) для КЛ напряжением до 15 кВ, используемых в России, Англии и США, составляет 10 кВ·А, в ФРГ и Бельгии 5...7 кВА. Опыт эксплуатации и анализ параметров установок показывает, что оптимальное значение мощности – 6...8 кВ·А. При этом максимально должны учитываться приведенные выше соотношения, связывающие КПД и сопротивление проводящего мостика в МП.

## 4. ИМПУЛЬСНЫЕ ИСКАТЕЛИ ПОВРЕЖДЕНИЙ

### 4.1. Характеристики импульсных искателей

На рис. 4.1 представлена общая структурная схема импульсных искателей повреждений. Она охватывает автоматические и неавтоматические локационные устройства, волновые искатели одностороннего действия и основной комплект для двусторонних волновых искателей.

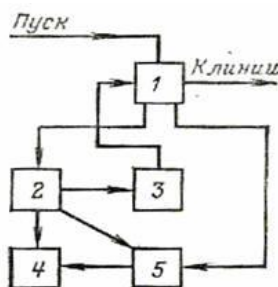


Рис. 4.1. Общая структурная схема импульсных искателей повреждений

Искатель находится в режиме ожидания, т. е. состоянии готовности к срабатыванию. При возникновении повреждения запускается блок управления 1. Он запускается либо от устройств релейной защиты, либо от собственного пускового органа, реагирующего, например, на уровень ВЧ-помех на линии. Блок 1 в зависимости от конкретных характеристик устройств подключает генератор зондирующих импульсов 3 и приемно-регулирующее устройство 5 к определенной линии (проводам линии). Выбор диапазона дальности и частотного диапазона, коммутация элементов регулировки усилительного тракта приемно-регулирующего устройства, относящегося к данной линии, выполняются по программе работы блока 1, установленной заранее, при наладке искателя на группе линий.

Во всех случаях от блока 1 запускается тактовый блок 2, синхронизирующий работу генератора 3, измерительного устройства 4 и приемно-регулирующего устройства 5. Зондирующие импульсы, подаваемые в обслуживаемую (подключенную блоком 1) линию, отражаются от МП или неоднородностей. Отраженные импульсы поступают в приемно-регулирующее устройство, а потом в измерительное устройство, где фиксируется интервал времени между зондирующим и отраженным от МП импульсами, пропорциональный искомому расстоянию.

В неавтоматических локационных искателях нет необходимости в автоматическом блоке управления 1. Волновые искатели одностороннего действия не имеют генератора зондирующих импульсов 3. В основные комплекты волновых двусторонних искателей, устанавливаемых на ведущем конце линии, вместо генератора зондирующих импульсов может входить генератор хранимых сигналов. Блок 3 может отсутствовать, если генератор хранимых сигналов находится в дополнительном комплекте. В блоках 4 и 5 волновых искателей измеряются временные интервалы, соответствующие пришедшим с линии фронтам волн или импульсам, пришедшим с противоположного конца (от дополнительных комплектов).

#### 4.2. Зондирующие импульсы

Как показали исследования [7, 8], фазочастотные характеристики (ФЧХ) волновых каналов силовых КЛ для частот  $f > 30$  кГц с достаточно высокой точностью аппроксимируются прямой линией. Это означает, что фазовая скорость для  $f > 30$  кГц практически остается неизменной. Для разных волновых каналов одной и той же КЛ скорости распространения весьма близки (их различие значительно меньше 1 %). Это физически объясняется экранированием электромагнитного поля металлической наружной оболочкой, препятствующей проникновению энергии в грунт.

Линейность ФЧХ может быть принята для КЛ с резиновой, пластмассовой и бумажно-масляной (пропитанной) изоляцией. В [8] показано, что для КЛ с этими же видами изоляции амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) единообразны и для любых волновых каналов аппроксимируются с приемлемой точностью экспонентой. На рис. 4.2 приведены примеры нормированных АЧХ кабельных линий.

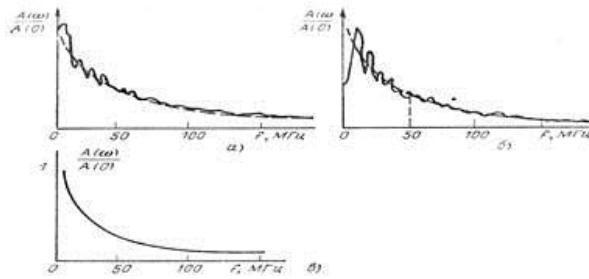


Рис. 4.2. Нормированные АЧХ волновых каналов кабельных линий:

*a* – канал «жила – жила» кабеля СБ 3х120, 10 кВ,  $l = 10$  м; *б* – канал «три жилы – оболочка» того же кабеля; *в* – канал «жила – жила» кабеля ШРПЛ 3 х 0,75, 1 кВ,  $l = 15$  м

Единообразный и достаточно близкий к монотонному характер АЧХ КЛ обеспечивает возможность согласования частотного спектра зондирующего импульса с этой АЧХ. Задача согласования сводится к подбору формы и длительности  $\tau_z$  зондирующего импульса, при которых основная часть амплитудного спектра отраженного импульса  $S_o(\omega)$  по подавляющей части энергии расположена в той же полосе частот, что и спектр зондирующего импульса  $S_z(\omega)$ :

$$S_o(\omega) = S_z(\omega)K(\omega), \quad (4.1)$$

где  $K(\omega)$  – коэффициент передачи участка волнового канала КЛ длиной  $2l$  для двойного пробега импульса).

При прямоугольном зондирующем видеоимпульсе длительностью  $T_z$  кабельная линия длиной  $2l$  является оптимальным фильтром, если отраженный от ее короткозамкнутого или открытого конца импульс, вернувшись к началу, превратится в квазиправильный длительностью по основанию примерно  $2\tau_z$  (рис. 4.3). Для участка любой длины  $l$  любого волнового канала существует своя критическая длительность  $\tau_{кр} = \tau_z$ , при которой этот участок представляет собой оптимальный фильтр.

С ростом длительности  $\tau_z$  при постоянной амплитуде зондирующего импульса повышается чувствительность, т. е. дальность измерений, так как увеличивается амплитуда отраженного импульса. Одновременно уменьшается разрешающая способность, так как отраженный импульс удлиняется и отражения от соседних неоднородностей накладываются друг на друга. На рис. 4.4 это повышение чувствительности показано в виде отношения амплитуд  $A_o/A_z$  отраженного и зондирующего импульсов, здесь же рассмотрено и снижение разрешающей способности в форме отношения некоторой минимальной для данной КЛ длительности  $\tau_{0, \min}$  к длительности отраженного импульса  $\tau_o$ , соответствующей заданному значению  $\tau_z$ .

Как показано в [8], близкая к оптимальной длительность прямоугольного зондирующего импульса:

$$\tau_{z, \text{опт}} = 5,4 \Psi l, \quad (4.2)$$

где  $l$  – длина КЛ;  $\Psi$  – коэффициент, определяемый по АЧХ соответствующего волнового канала.

С достаточной для практики точностью коэффициент передачи равен:

$$K(\omega) = e^{-2\Psi\omega l}, \quad (4.3)$$

откуда  $\ln K(\omega) = -2\Psi\omega l$ . Последняя зависимость графически представляет собой прямую линию, по которой при заданных  $\Psi$  и  $l$  возможно определить  $\omega$ .



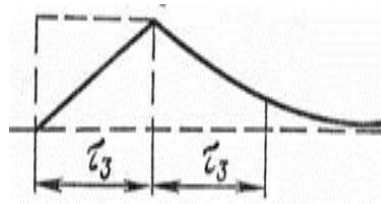


Рис. 4.3. Квазипреугольный отраженный импульс, полученный после пробега прямоугольным зондирующим импульсом участка волнового канала КЛ оптимальной длины

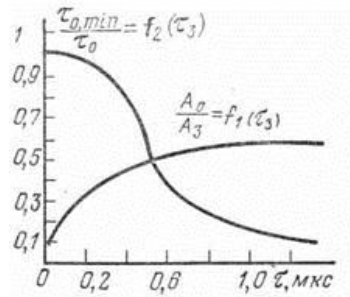


Рис. 4.4. Графики изменения чувствительности ( $A_0/A_3$ ) и разрешающей способности ( $\tau_{0,min}/\tau_0$ ) в зависимости от длительности зондирующего импульса  $\tau_3$  при ОМП КЛ

Значительное повышение разрешающей способности обеспечивает применение сдвоенного импульса (рис. 4.5, а). Два прямоугольных одинаковых по длительности импульсы имеют разную полярность. Второй импульс отстает по времени на интервал  $\tau_3$  и имеет регулируемую амплитуду. При амплитуде первого импульса  $A$  амплитуда второго составляет  $nA$ , где  $0 < n < 1$ . На рис. 4.5, б приведены нормированные спектры такого зондирующего импульса для различных  $n$ , причем через  $S_{\Sigma}(\omega)$  обозначен спектр «сдвоенного» импульса, через  $S_1(0)$  – значение спектральной характеристики одиночного импульса ( $n = 0$ ) при  $\omega = 0$ .

С ростом  $n$  спектр обогащается более высокими частотами, так как максимум  $S_{\Sigma}(\omega)$  смещается вправо по оси частот, а это значит, что увеличивается разрешающая способность. Частотный спектр отраженного импульса – это произведение спектра зондирующего импульса и коэффициента передачи КЛ длиной  $2\ell$  (за счет двойного пробега). Регулировкой коэффициента коррекции  $n$  можно добиться уменьшения длительности отраженного импульса. Отраженный импульс становится однополярным. Для каждой длины двойного пробега  $2\ell$  существует значение  $n$ , когда отраженный импульс минимален по длительности, т. е. обеспечивается максимальная разрешающая способность.

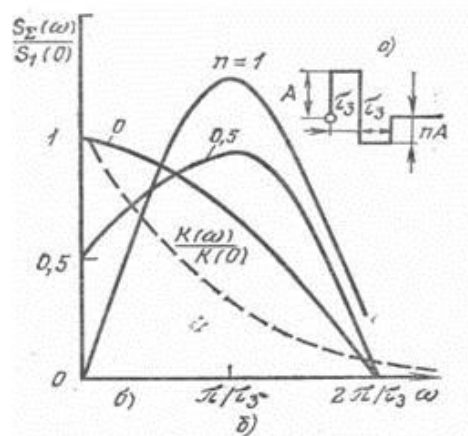


Рис. 4.5. Форма двухполярного зондирующего импульса (а) и кривые изменения его частотного спектра (б) при различных значениях коэффициента коррекции  $n$

$$S_{\Sigma}(\omega) = A\tau_3 \frac{\sin\left(\frac{\omega\tau_3}{2}\right)}{\frac{\omega\tau_3}{2}} \left(1 - ne^{-j\omega\tau_3}\right) ; \quad (4.4)$$

$$S_{\Sigma}(0) = A\tau_3 (1 - n) ; \quad (4.5)$$

$$S_{\Sigma}\left(\frac{\pi}{\tau_3}\right) = \frac{2}{\pi} A\tau_3 (1 + n) ; \quad (4.6)$$

$$S_{\Sigma}\left(\frac{2\pi}{\tau_3}\right) = 0 . \quad (4.7)$$

На лицевую панель искателя выводится ручка потенциометра «Компенсация», плавно регулирующая амплитуду второго импульса. Компенсируется повышенное затухание более высоких частотных составляющих и по сравнению с зондированием монополярным импульсом разрешающая способность повышается в 5,4 раза.

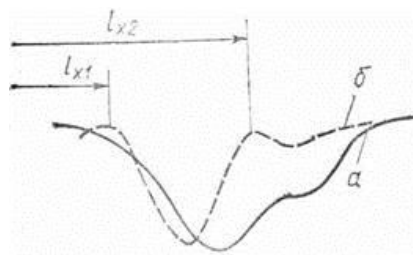


Рис. 4.6. Отраженные сигналы для КЛ с двумя шунтирующими сопротивлениями («утечками») при отсутствии (а) и наличии (б) корректирующего импульса противоположной полярности

На рис.4.6 показаны сигналы, отраженные от двух шунтирующих сопротивлений ( $R_{ш1} = 200$  Ом и  $R_{ш1} = 420$  Ом), имитирующих утечки на расстояниях  $l_{x1} = 100$  м и  $l_{x2} = 120$  м. Волновое сопротивление испытуемого кабеля РППШ-0,75 х 2 всего несколько десятков Ом, поэтому отыскание таких утечек – достаточно сложная задача. При отсутствии компенсации (рис. 4.6, кривая а) выявить наличие второй (более удаленной от места измерения) утечки не представляется возможным. Видно лишь незначительное изменение кривизны хвоста импульса, отраженного от первой утечки. Введение компенсации с  $n = 0,6$  (рис. 4.6, кривая б) позволяет четко зафиксировать вторую утечку в виде отдельного отраженного импульса. Впервые двухполярный импульс с регулированием величины  $n$  применен в неавтоматических искателях типа Р5-10.

Для выделения полезного импульса, т. е. отраженного от МП, на фоне множества импульсов, отраженных от неоднородностей КЛ, в качестве зондирующего сигнала эффективнее использовать наложение видеоимпульса (короткого импульса) на единичную ступень напряжения [8]. При этом ступень напряжения позволяет различить повреждение от неоднородностей, а короткий импульс обеспечивает высокие точность отсчета и разрешающую способность. Дело в том, что за местом повреждения меняется уровень напряжения при воздействии ступени напряжения.

На рис. 4.7, а и б, где показаны импульсные характеристики (ИХ), хорошо видно такое изменение уровня. На рис. 4.7, в и д уровень ступени напряжения не изменяется (лишь кратковременные выбросы отражают влияние реактивности неоднородностей). На рис. 4.7, г уровень меняется, так как включение конденсатора в рассечку КЛ для длинного импульса равносильно обрыву.

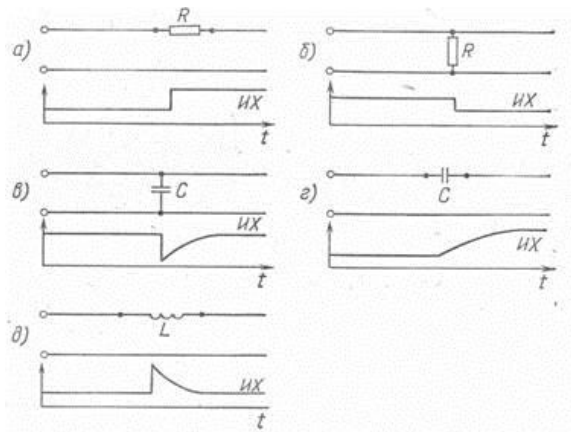


Рис. 4.7. Упрощенные импульсные характеристики для КЛ с дополнительно включенными сосредоточенными элементами, имитирующими

неоднородности волнового сопротивления

**Реальные изменения** уровня в случае повреждения (КЗ) показаны на рис. 4.8, б ( $E'_1 \neq E'_2$ ). В случае неоднородности (соединительной муфты) уровень под воздействием ступени напряжения не меняется ( $E_1 = E_2$ ). Для сравнения на рис. 4.8, а приведена импульсная характеристика той же КЛ при зондировании коротким импульсом с  $\tau_3 = 1$  мкс. Отражения от муфты и места КЗ соответствуют примерно одному уровню напряжения.

Ухудшение выявления неоднородности (муфты) и улучшение выявления места ответвления по мере удлинения зондирующего импульса вплоть до единичной ступени напряжения показано на рис. 4.9.

Практически за единичную ступень можно принять прямоугольный импульс длительностью в 2-3 раза большей, чем  $2L/v$ , где  $L$  – полная длина измеряемой КЛ;  $v$  – скорость распространения сигнала.

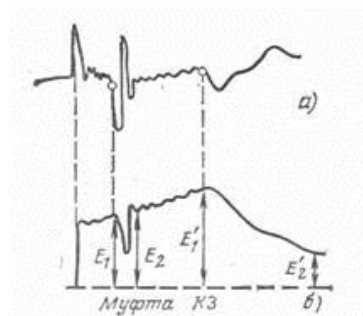


Рис. 4.8. Импульсные характеристики КЛ с КЗ и соединительной муфтой при

зондировании коротким импульсом (а) и единичной ступенью напряжения (б)

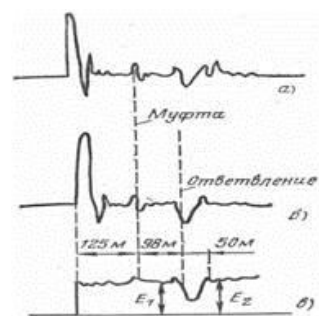


Рис. 4.9. Импульсные характеристики КЛ с соединительной муфтой и ответвлением при различных длительностях зондирующего импульса а –  $\tau_3 = 50$  нс; б –  $\tau_3 = 300$  нс; в – единичная ступень напряжения

На рис. 4.10, б показана ИХ, полученная при наложении короткого зондирующего импульса ( $\tau_3 = 1$  мкс) на ступень напряжения. Отчетливо видны отражения от обрыва (конца КЛ) и соединительных муфт, и при

этом сохранена крутизна отраженных импульсов, т. е. точность отсчета. Для сравнения на рис. 4.10, а показана ИХ при зондировании только ступенью напряжения. Отражения от муфт почти не видны. Точность отсчета низкая, так как от места обрыва (конца КЛ) отражение получается с пологим фронтом. Рис. 4.10 наглядно демонстрирует достоинства использования сложного (комбинированного) зондирующего сигнала «ступень – короткий импульс». Впервые такие сложные сигналы использованы в приборе Р5-10.

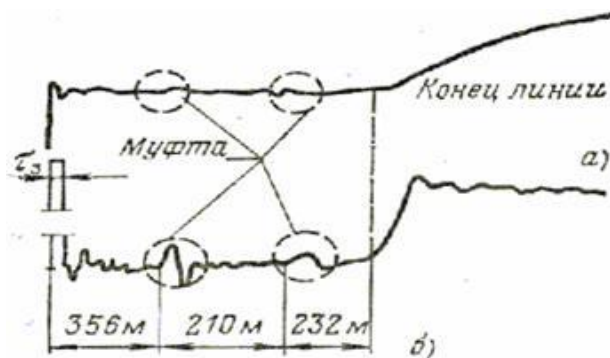


Рис. 4.10. Импульсные характеристики КЛ с двумя соединительными муфтами при зондировании ступенью напряжения (а) и способом наложения короткого импульса на ступень напряжения (б)

Таким образом, близким к оптимальному по форме для ОМП силовых КЛ является видеоимпульс, полученный наложением короткого двухполярного импульса на единичную ступень напряжения. Для ОМП каждой конкретной КЛ существует оптимальная длительность короткого импульса и значение коэффициента коррекции  $n$ , обеспечивающего максимальную разрешающую способность. Это положение справедливо как для контрольных кабелей, так и для кабелей связи.

## 5. МЕТОДЫ ОМП

### 5.1. Характеристика индукционных методов ОМП

Индукционные методы предназначены для топографического (трассового) ОМП кабельных и воздушных линий. Для КЛ, проложенных в земле, индукционные методы позволяют также уточнить трассу линии, установить глубину залегания кабеля и места расположения соединительных муфт.

Сущность индукционных методов заключается в индикации параметров магнитного поля токов, протекающих по проводам (жилам) и в земле вдоль трассы линии. Изменения параметров магнитного поля вблизи МП или в иных характерных точках трассы улавливаются с помощью специальных датчиков (индукционных рамок), усилителей и индикаторов при их перемещении вдоль трассы ВЛ или КЛ.

Для КЛ напряжением до 35 кВ ОМП производится с помощью специального генератора повышенной частоты после выделения и отключения поврежденного участка. Выделение же поврежденного участка КЛ, который можно отключить коммутационной аппаратурой, при однофазном замыкании на землю осуществляется индукционным методом за счет индикации параметров магнитного поля емкостного тока на границах участка, т. е. в РУ. Для ВЛ параметры магнитных полей емкостных токов сети используются и для выделения участков, и для ОМП.

Важное значение для индукционного метода имеет выбранный диапазон рабочих частот. Для всех индукционных методов, за исключением не нашедшего распространения импульсно-индукционного метода, применяется так называемый звуковой (тональный) диапазон частот. Для линий, включенных в сеть, практически используются промышленная частота 50 Гц и ее нечетные гармоники вплоть до 13-й. Для отключенных КЛ частотный диапазон составляет 0,4...12 кГц.

Для ОМП в трехфазных сетях существенные различия имеют характеристики магнитных полей токов нулевой последовательности и фазных токов.

### 5.2. Индукционные методы ОМП для отключенных от сети кабельных линий

Эти методы являются наиболее распространенными при трассовом поиске МП силовых КЛ. Для их использования необходимо снизить путем прожигания переходное сопротивление в МП до единиц или даже долей ома (фирма Seba dynatronic (ФРГ) указывает максимально допустимое значение в 10 Ом).

**Определение трассы КЛ и глубины залегания кабеля.** При определении трассы один вывод генератора звуковой частоты присоединяется к неповрежденной жиле кабеля, а другой – к его заземленной оболочке. Противоположный конец используемой жилы также заземляется (рис. 5.1). Силовые линии магнитного поля «одиначного» тока представляют собою концентрические окружности с центром в используемой жиле кабеля.

Ток при поисках трассы устанавливается в пределах  $0,1 \dots 10$  А в зависимости от глубины прокладки и наличия помех.

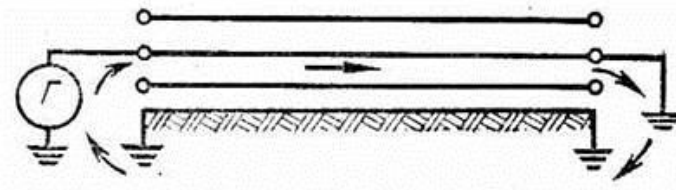


Рис. 5.1. Схема включения генератора при определении трассы  
и глубины залегания КЛ

Если ось приемной рамки кабелеискателя расположена горизонтально в плоскости, перпендикулярной оси кабеля (рис. 5.2, а), то над ним будет наводиться максимальная ЭДС. При перемещении рамки в стороны от трассы кабеля значение ЭДС убывает. Это обстоятельство и используется для ориентировочного нахождения трассы.

Если ось рамки расположена вертикально, то точно над кабелем ЭДС равна нулю, так как витки рамки не пересекаются магнитным потоком (рис. 5.2, б). При перемещении рамки в стороны от трассы кабеля ЭДС будет резко возрастать, а затем медленно убывать. Это свойство используется для точного определения трассы кабеля.

Если ось рамки кабелеискателя расположена параллельно оси кабеля (рис. 5.2, в), то ЭДС равна нулю. При нарушении параллельности ЭДС возрастает, что используется для определения направления трассы кабеля.

Иногда (хотя и очень редко) ток заземления растекается от вывода генератора по оболочкам соседних кабелей, находящихся под рабочим напряжением. При этом минимум звучания выявляется над тем кабелем, по которому течет ток заземления, а над кабелем, подключенным к генератору, звучание совсем не прослушивается. В таких случаях необходимо пользоваться схемой двухпроводного включения, т. е. включать выводы генератора на две жилы, закороченные с противоположной стороны перемычкой (рис. 5.3). При этом точность определения трассы ниже, чем при включении генератора по схеме «жила – земля».

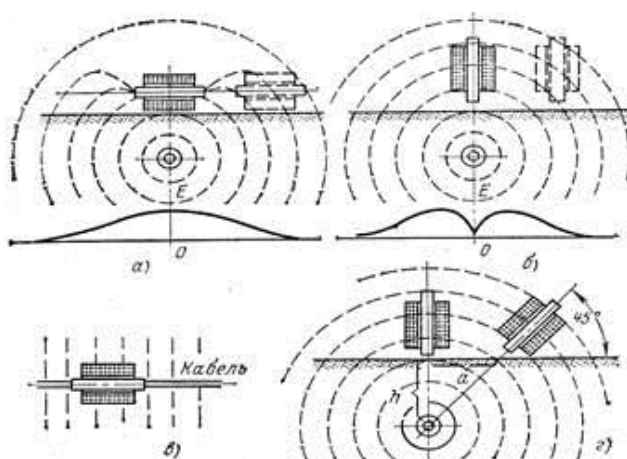


Рис. 5.2. Варианты расположения оси приемной рамки относительно поверхности грунта над кабелем: а – горизонтально-поперечное; б – вертикальное; в – горизонтально-продольное; г – под углом  $45^\circ$  к вертикали

Для определения глубины залегания кабеля используется та же схема измерения, что и для определения трассы. Ось рамки кабелеискателя ставится вертикально, и прочерчиваемая на поверхности земли определяет трассу кабеля. Поворачивая рамку таким образом, чтобы ее ось была под углом  $45^\circ$  к вертикальной плоскости, проходящей через кабель, рамку отводят в сторону от намеченной трассы. В зоне отсутствия ЭДС (отсутствие звучания в наушниках приемника) проводится вторая линия. Расстояние  $a$  между двумя отмеченными линиями будет равно глубине залегания кабеля  $h$  (рис. 5.2, *г*).

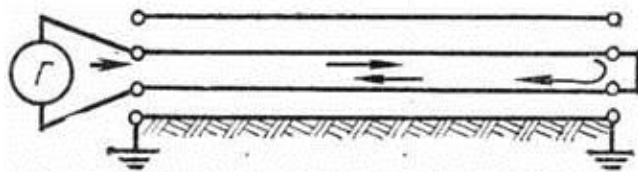


Рис.5.3. Включение генератора по схеме «жила – жила»

Для определения места повреждения КЛ при замыкании между жилами (междуфазные повреждения) и отыскания соединительных муфт на трассе используют схему (рис. 5.4), в которой в две поврежденные жилы кабеля от генератора  $\Gamma$  подается ток (5...25 А) повышенной частоты.

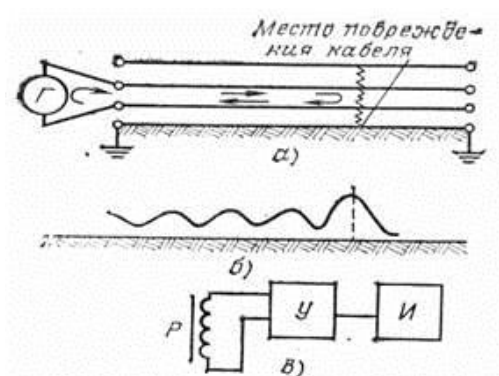
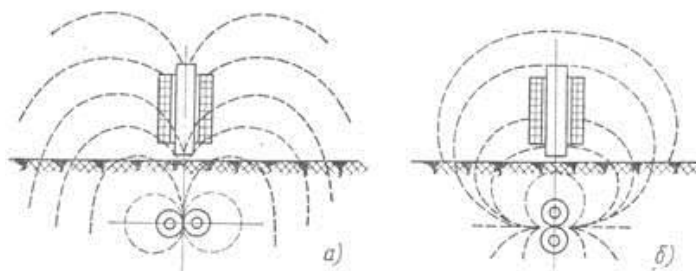


Рис. 5.4. Схема включения генератора при замыкании между жилами КЛ

(а), кривая изменения уровня напряженности магнитного поля вдоль трассы поврежденного кабеля (б) и структурная схема приемника кабелеискателя (в)

С рамкой  $P$ , усилителем  $У$  и индикатором  $И$  (обычно – телефоном) оператор движется по трассе кабеля, улавливая характерное звучание, обусловленное наведенной в рамке и усиленной ЭДС. Протекающий по жилам ток создает магнитное поле, силовые линии которого при различном взаимном положении жил показаны на рис. 5.5. В приемной рамке, магнитная ось которой расположена вертикально над кабелем, при ее перемещении по трассе будет индуцироваться периодически изменяющаяся (в соответствии со скруткой жил) ЭДС. Минимальное значение ЭДС соответствует вертикальному расположению жил, а максимальное – горизонтальному.

Скрутка жил кабеля с шагом повива – от 0,5 до 3 м в зависимости от сечения жил. В соответствии с этим шагом изменяется напряженность результирующего магнитного поля на поверхности земли над кабелем (рис. 5.4).



Над местом расположения муфты длина интервалов между точками максимальной слышимости заметно нарушается и звучание в телефоне резко усиливается (из-за большего расстояния между жилами в муфте). Это обстоятельство используется для отыскания места расположения соединительных муфт на трассе.

Из рис. 5.6 видно, что на некоторых участках трассы звучание резко ослабляется. Это происходит вследствие большой глубины залегания или экранировки кабеля металлическими трубами. За исключением таких участков, звучание будет слышно на той части трассы, где протекает ток от генератора, т. е. до МП.

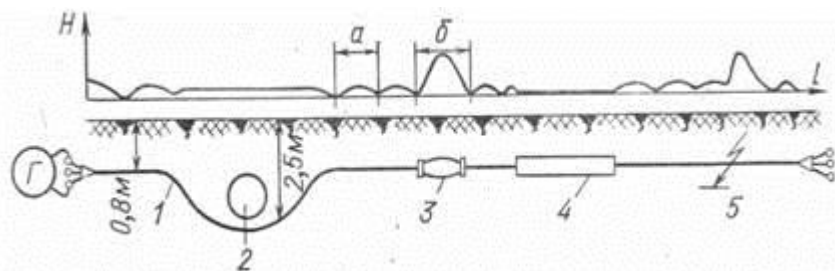


Рис. 5.6. Кривая изменения напряженности магнитного поля  $H$  над КЛ при наличии соединительных муфт:  $a$  – шаг скрутки (повива) жил;  $b$  – длина муфты ( $b > a$ );

$1$  – повышенное заглубление кабеля;  $2$  – теплопровод;  $3$  – соединительная муфта;  $4$  – участок кабеля в металлической трубе;  $5$  – место повреждения

Над МП напряженность магнитного поля несколько усиливается и звучание в телефоне заметно возрастает, затухая совсем на расстоянии 0,5 м за местом повреждения (рис. 5.4 и 5.6). Поэтому особое внимание надо обращать на «концевой эффект». Если звучание прекращается плавно или обрывается без заметного усиления, то это говорит о том, что кабель проложен либо на большой глубине, либо заложен в металлическую трубу. Если же звучание усиливается, а далее скрутка не прослушивается, то рамка находится над МП. Рекомендуется производить измерения с двух сторон, при этом звучание должно прекращаться в одном и том же месте.

При недостаточной степени прожигания изоляции одной или обеих жил на оболочку или выгорании отрезка одной из жил (более 5...10 см) кроме магнитного поля межпроводного тока пары  $I(ж)$  образуется поле тока растекания  $I(p)$  (рис. 5.7). Напряженность магнитного поля тока растекания во много раз больше напряженности межпроводного поля, образованного током  $I(ж)$  такого значения, как  $I(p)$ . Поэтому даже при меньшем относительно основного тока значении  $I(p)$  создаются большие помехи непериодического медленно уменьшающегося за МП звучания (рис. 5.7, кривая  $1$ ). Устранение таких помех иногда достигается дополнительным прожиганием, если последнее позволяет получить КЗ жил кабеля.

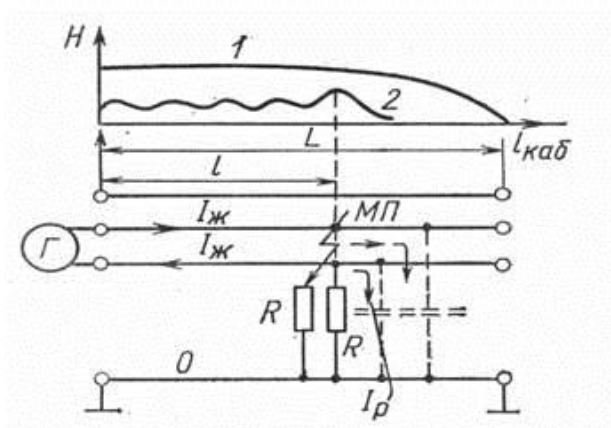


Рис. 5.7. Кривые изменения напряженности магнитного поля  $H$  при наличии тока растекания:  $1$  – для поля тока растекания  $I(p)$ ;  $2$  – для поля пары токов  $I(ж)$ ;

Погрешность определения места замыкания между жилами индукционным методом с поверхности земли не превышает  $\pm 0,5$  м, а при работе на открытом кабеле составляет несколько сантиметров. Индукционный метод определения места замыкания между жилами (или замыкания двух жил на оболочку в одной точке кабеля) весьма эффективен, поскольку до МП есть периодическое (в соответствии с шагом скрутки) изменение сигнала, за МП этого изменения нет, и в подавляющем большинстве случаев за МП принимаемый сигнал уменьшается в десятки раз.

Трудности возникают, если велика глубина залегания кабеля  $h$  или значителен уровень помех от действия проходящих вблизи ВЛ, соседних кабелей или сетей, питающих городской транспорт. При этих условиях оказывается недостаточным абсолютное значение сигнала либо его значение по отношению к уровню помех. Сигнал характеризуется напряженностью магнитного поля пары токов  $I(\text{ж})$ , протекающих от генератора по скрученным жилам,

$$H_{\Pi} = \frac{I_{\text{ж}} dk_3 k_c}{2 \pi h^2} = \sqrt{\frac{P_{\Gamma}}{Z_{\text{вх}}}} \frac{dk_3 k_c}{2 \pi h^2}, \quad (5.1)$$

где  $P(\Gamma)$  – мощность генератора;  $Z(\text{вх})$  – входное сопротивление поврежденной КЛ;  $k_3$  – коэффициент экранирования потока электромагнитной энергии сквозь оболочку и броню кабеля;  $k_c$  – коэффициент, учитывающий ослабление напряженности поля вследствие скрутки жил (коэффициент скрутки);  $d$  – диаметр жилы кабеля. При этом в рамке наводится ЭДС

$$E_{\Pi} = H_{\Pi} 2 \pi f_{\Gamma} \omega s \mu, \quad (5.2)$$

где  $f_{\Gamma}$  – частота генератора;  $\square$  – число витков рамки,  $s$  – площадь среднего витка рамки;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала сердечника рамки.

Подставляя выражение (5.1) в (5.2), получаем

$$H_{\Pi} = \sqrt{P_{\Gamma}} \omega s \mu d \frac{f_{\Gamma} k_3 k_c}{h^2 \sqrt{Z_{\text{вх}}}}. \quad (5.3)$$

Из анализа (5.3) следует, что существует некоторый оптимальный диапазон рабочих частот, которому соответствует область наибольших значений  $E_{\Pi}$ , т. е. значений сигнала для заданной мощности генератора  $P_{\Gamma}$ . Ход кривой  $E_{\Pi} = F(f_{\Gamma})$  определяется частотной зависимостью сомножителя  $f_{\Gamma} k_3 / \square Z(\text{вх})$ . С ростом  $f_{\Gamma}$  значение  $E_{\Pi}$  сначала увеличивается, так как  $\square Z(\text{вх})$  меняется медленнее от  $f_{\Gamma}$ , чем по линейному закону. Но при дальнейшем увеличении  $f_{\Gamma}$  начинает проявляться экранирующее действие оболочки и брони, приводящее к уменьшению  $E_{\Pi}$ . Таким образом, функция  $f_{\Gamma} k_3 / \square Z(\text{вх})$  и соответственно сигнал имеют максимум в некотором диапазоне частот. Оптимальная частота при отыскании междуфазных повреждений, по данным В. В. Платонова, лежит в диапазоне 1000...2000 Гц для кабелей типа АСБ и 500...1000 Гц для кабелей типа ААБ.

Из анализа соотношения (5.3) также следует, что сигнал существенно уменьшается с увеличением глубины залегания кабеля и прежде всего из-за того, что  $k_c$  является функцией  $h$ . Увеличение  $h$ , например, вдвое (от 0,9 до 1,8 м) при шаге скрутки  $\square = 1,8$  м приводит к уменьшению  $k_c$  от 0,5 до 0,07, т. е. в 7,2 раза. Если еще учесть, что  $E_{\Pi}$  пропорциональна  $1/h^2$ , то получаем, что удвоение  $h$  ослабляет сигнал в 30 раз.

Таким образом, именно скрутка жил затрудняет поиск междуфазных повреждений на большой глубине, хотя в целом при достаточном сигнале она обеспечивает выявление МП.

Соответственно верхнюю границу частоты сигнала целесообразно выбирать равной 6500 Гц.

Для успешного поиска междуфазных повреждений с помощью селективного приемника, как правило, достаточно использовать полупроводниковый генератор мощностью 150...200 Вт.

**Однофазные повреждения (замыкания жилы на оболочку кабеля).** Основным препятствием, которое встречается на пути определения места однофазного повреждения, является мешающее (маскирующее) действие поля тока растекания в земле



Дело в том, что ток звуковой частоты  $I = I_1 + I_2$ , протекая по поврежденной жиле, возвращается в генератор не только по оболочке ( $I_1$ ) но и по земле ( $I_2$ ). Следовательно, до МП существует поле пары токов «поврежденная жила – оболочка»  $I_1$  и поле одиночного тока  $I_2$ , протекающего по оболочке до ближайшего ее заземления и уходящего в землю (к заземленному полюсу генератора). Тогда по обе стороны от МП существует одно и то же поле с напряженностью

$$H_0 = I_2 / 2\pi h, \quad (5.4)$$

создаваемое одиночным током. Напряженность этого поля во много раз превышает напряженность поля пары токов

$$H_{\pi} = k_3 I_1 d / 2\pi h^2. \quad (5.5)$$

При этом

$$H_0 / H_{\pi} = I_2 h / k_3 I_1 d = 30 \dots 100.$$



Рис.5.8. Структурная схема развития направлений индукционного поиска повреждений вида «жила-оболочка»

Таким образом,  $H_0$  существенно превышает  $H_{\pi}$  и выявление сигнала (пропорционального напряженности поля пары токов) на фоне такой сильной маскировки – существенно затрудняет поиск однофазных повреждений. Решение этой проблемы должно предусматривать совершенствование не только аппаратуры, но и методики поиска. Рассмотрим структурную схему, характеризующую развитие методики поиска (рис. 5.8). Первое направление предполагает уменьшение напряженности поля одиночного тока или ослабление его мешающего действия. При этом полезным, подлежащим обнаружению и измерению является сигнал, обусловленный парой токов. Второе направление основано на выявлении особенностей (изменений, отклонений) напряженности поля одиночного тока в зоне МП. Задача состоит только в том, чтобы их обнаружить.

Ниже рассматриваются методики поиска однофазных повреждений в указанных направлениях

**Выявление напряженности поля пары токов. Измерение производной ЭДС по длине.** Во ВНИИЭ предложено измерять не ЭДС, наводимую в рамке, а производную ЭДС по длине перемещения рамки вдоль трассы. Генератор включают по схеме «поврежденная жила-неповрежденная жила» и неповрежденную жилу заземляют на дальнем конце (рис. 5.9). В этом случае напряженность медленно изменяющегося поля тока растекания  $I(r)$  характеризуется производной, близкой к нулю, а напряженность поля пары токов  $I(j)$ , изменяющаяся от максимума до минимума с шагом скрутки жил кабеля, характеризуется некоторым уровнем сигнала. Именно скрутка жил, периодически изменяя направление вектора напряженности магнитного поля пары токов с вертикального на горизонтальное, позволяет получить изменение уровня производной ЭДС по длине вдоль оси кабеля. За МП пары токов, протекающих по скрученным жилам, нет, периодическое изменение производной исчезает, а уровень производной снижается. Таким образом, задача сводится к регистрации периодических, в соответствии с шагом скрутки жил, низкочастотных изменений  $U_{\square}$  напряжения звуковой частоты, постоянный уровень которого  $U_{\square}$ , определяется напряженностью электромагнитного поля одиночного тока.

Метод поиска однофазных повреждений затруднен двумя обстоятельствами: мало отношение  $U_{\square}/U_{\square} = H_{\pi}/H_0 = 0,01 \dots 0,03$  и для получения полезного сигнала  $U_{\square}$  необходимо перемещение рамки вдоль трассы. Поэтому всякие отклонения от трассы

(в сторону и по высоте), изменение ориентации рамки относительно оси кабеля, которых трудно избежать при перемещении рамки, вызывают так называемые динамические помехи.

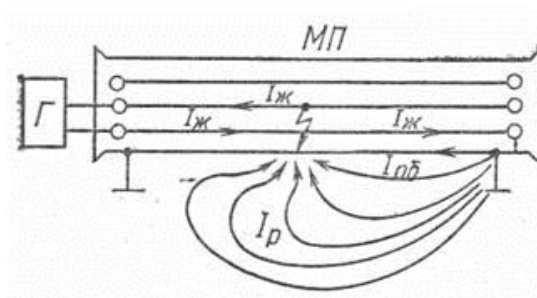


Рис. 5.9. Схема токораспределения при поиске МП по изменению производной магнитного поля вдоль КЛ

При реализации метода приходится выделять обусловленную скруткой жил низкочастотную огибающую  $U_{\square}$  звукового сигнала при  $U_{\square}/U_{\square} = 0,01 \dots 0,03$  и полезные, обусловленные скруткой жил периодические изменения сигнала (около 1 % постоянного уровня) среди ложных, связанных с перемещением рамки. Причем ложные изменения могут превышать 1 % постоянного уровня.

Практическое решение обеих задач, а следовательно и проблема в целом, упрощаются при увеличении отношения  $U_{\square}/U_{\square}$ . Этого можно добиться снижением уровня  $U_{\square}$ , создаваемого полем одиночного тока растекания в земле.

*Уменьшение напряженности поля одиночного тока в зоне МП* Можно отметить два пути уменьшения напряжения, наводимого в приемной рамке от действия поля тока растекания в земле: компенсация в кабельной линии и компенсация в приемном устройстве.

Компенсации первого типа предложены в [9]. В соответствии с этим методом генератор звуковой частоты следует подключать согласно схеме, показанной на рис. 5.10, а. Для токов, протекающих в жилах кабеля, оболочке и земле, эту схему можно рассматривать как составленную из двух более простых схем (рис. 5.10, б, в).

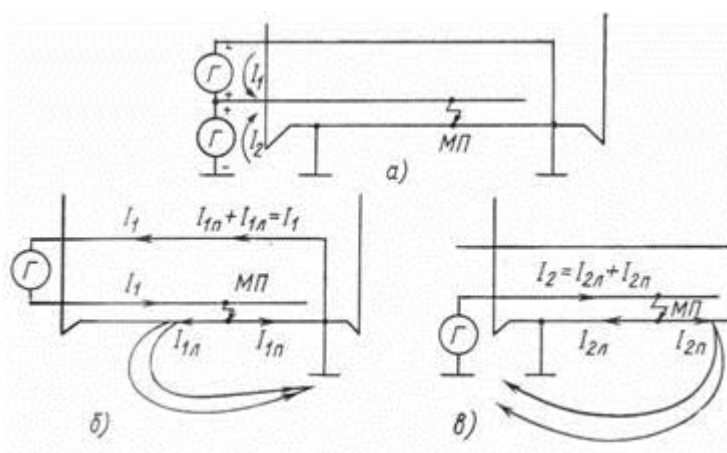


Рис. 5.10. Схемы осуществления компенсации токов растекания в КЛ: а – полная схема; б и в – составляющие полной схемы

В схеме, приведенной рис. 5.10, б, генератор звуковой частоты задает ток  $I_1$ , который в МП растекается вправо ( $I_{1п}$ ) и влево ( $I_{1л}$ ). На дальнем конце обе составляющие суммируются и возвращаются к генератору по неповрежденной жиле. Отношение  $I_{1л}/I_{1п}$  следует считать неопределенным вследствие неопределенности условий растекания тока в земле (различная влажность грунтов, различные способы заземления оболочки). Поэтому в общем виде

$$I_{1л} = k_1 I_1; I_{1п} = (1 - k_1) I_1, \quad (5.6)$$

где  $k_1$  – коэффициент, постоянный для определенного кабеля и конкретных условий растекания ( $k_1 = 0 \dots 1$ ).

Токи, протекающие в жилах, оболочке ( $I_{об}$ ) и земле, создают электромагнитные поля, которые наводят ЭДС в индукционной рамке приемника. В схеме рис. 5.10, б можно считать, что до МП существуют поле пары жила–жила (ток пары  $I_1$ ) и поле одиночного тока  $I_{1п}$ , протекающего по оболочке и уходящего в землю. За МП существуют поле пары неповрежденной жила – оболочка  $I_{1п}$  и поле одиночного тока  $I_{1л}$ , протекающего по неповрежденной жиле. Таким образом, как до МП, так и за ним, в направлении справа налево протекает одиночный ток  $I_{1л}$ , создающий мешающее поле, маскирующее полезный сигнал.

В схеме, приведенной на рис. 5.10, в, от генератора звуковой частоты в поврежденную жилу вводится ток  $I_2$ , который в МП тоже растекается по оболочке вправо и влево ( $I_{1п}$ ,  $I_{2л}$ ). Правая и левая составляющие тока  $I_2$  суммируются на ближнем конце кабеля и замыкаются через заземленный вывод генератора. При этом можно записать

$$I_{2п} = k_2 I_2; I_{2л} = (1 - k_2) I_2, \quad (5.7)$$

где  $k_2 = 0-1$  – коэффициент, причем  $k_2 \leq k_1$ ;  $k_2 \leq 1 - k_1$ .

В схеме, показанной на рис. 5.10, в, до МП существуют поле пары поврежденная жила – оболочка  $I_{2л}$  и поле одиночного тока  $I_{2п}$ , протекающего по оболочке и уходящего в землю. И в этой схеме по обе стороны от МП протекает неизменный одиночный ток  $I_{2п}$ , создающий поле, мешающее выявлению полезного сигнала. Однако в схеме на рис. 5.10, б одиночный ток протекает слева направо, т. е. навстречу одиночному току, протекающему в схеме на рис. 5.10, а. Поэтому в общей схеме (рис. 5.10, а), получаемой в результате наложения составляющих схем, одиночный ток, протекающий в зоне растекания как до МП, так и за ним, равен разности  $I_{1л} - I_{2п}$ . Эта разность может быть малой при выполнении условия

$$I_1 k_1 = I_2 k_2. \quad (5.8)$$

Таким образом, при определенном соотношении между токами  $I_1$  и  $I_2$  может быть обеспечен малый одиночный ток в зоне МП, а следовательно, улучшено исходное для рамки соотношение между напряжениями  $U_{\square}$  и  $U_{\square}$ .

Так как ослабление напряженности мешающего поля тока растекания в земле может быть зафиксировано по снижению уровня сигнала, принимаемого в зоне МП при постоянном коэффициенте усиления приемника и неизменной ориентации рамки, то условие (5.8) следует обеспечивать путем изменения тока  $I_1$  или  $I_2$  до тех пор, пока это изменение понижает уровень принимаемого сигнала. При реализации этого метода компенсации возникают определенные эксплуатационные трудности, обусловленные сложной схемой подключения генератора и необходимостью взаимодействия двух операторов, один из которых находится на трассе у приемного устройства, а другой – на трансформаторной подстанции у генератора.

Из методов компенсации второго типа (компенсация в приемном устройстве) заслуживает внимания дифференциально-частотный метод. Его сущность заключается в том, что в КЛ посылают токи двух частот  $f_1$  и  $f_2$ . Сигналы  $U_{f_1}$ ,  $U_{f_2}$  принимают по двум узкополосным каналам, усиливают и подают на разностный индикатор (рис. 5.11).

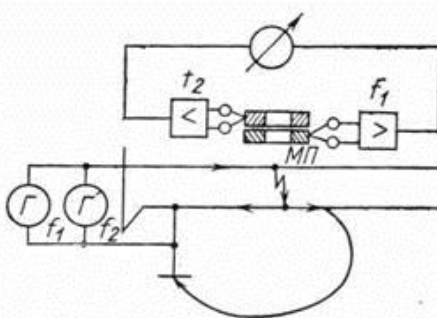


Рис. 5.11. Схема дифференциально-частотного метода

**Определение МП вида жила-оболочка методом накладной рамки.** Этот метод применяется для определения МП открыто проложенных КЛ (в помещениях, туннелях, подвалах и пр.). Он может быть применен также для КЛ, проложенных в земле. В этом случае необходимо произвести раскопку нескольких шурфов в зоне повреждения кабеля. Кроме того, методом накладной рамки можно определить отключенный, например, для ремонта кабель, лежащий в пучке других кабелей.

Генератор включают по схеме поврежденная жила – земля (см. рис. 5.7). Ток в поврежденной жиле устанавливают от 0,5 до 5 А. Если кабель проложен в земле, то на трассе КЛ в зоне МП, определенной каким-либо дистанционным методом, раскапываются шурфы и на открытых кабелях сопоставляются характеры изменения напряженности магнитного поля при вращении рамки вокруг оси кабеля по его оболочке.

Если шурф расположен до МП со стороны генератора звуковой частоты, то по кабелю, как было отмечено выше, протекают токи  $I-I_2$  и  $I_1$ , образующие междупроводное поле. За один оборот накладной рамки вокруг оси кабеля в телефоне будут прослушиваться два максимума и два минимума звучания (рис. 5.12, а). Если шурф расположен за МП кабеля, то по его оболочке протекает ток  $I_2$ , образующий практически неизменяющееся магнитное поле. В этом случае за один оборот накладной рамки вокруг оси кабеля в телефоне кабелеискателя будет прослушиваться неизменяющееся звучание (рис. 5.12, б).

Таким образом, по различию характера звучания определяется поврежденный участок трассы. Если расстояние между шурфами небольшое, то, раскопав перемычку между ними, находят МП кабеля. При большом расстоянии между шурфами раскапывают дополнительный шурф, уменьшая зону расположения МП, и т. д.

Однако применение метода накладной рамки при его использовании для КЛ, проложенных в земле, требует большого объема работ по раскопке шурфов.

Этот метод возможно применять только при наличии металлического замыкания между жилой и оболочкой кабеля.

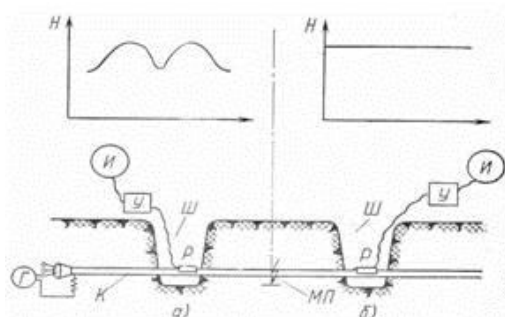


Рис. 5.12. Характеристики напряженности магнитного поля  $H$  при определении МП с помощью накладной рамки: а – до места повреждения; б – за местом повреждения;

Г – генератор; Р – рамка; У – усилитель; И – индикатор (телефон); Ш – шурфы; К – кабель; МП – место повреждения

**Метод электроразведки.** При невозможности подключения генератора синусоидальных сигналов непосредственно к жиле кабеля (например, в случае поиска трассы оставленного в земле отрезка кабеля) используют метод электроразведки [10]. В этом случае генератор подключают к основной индукционной рамке, наводящей ток в металлической оболочке кабеля, а приемное устройство – к другой индукционной рамке. При расположении, в частности, осей обеих рамок под прямым углом исключается их взаимное влияние. Поиск трассы осуществляется аналогично обычному присоединению генератора по схеме жила – земля.

### 5.3. Акустические методы ОМП

Эти методы также относятся к группе контактных. В результате акустического контакта с МП воспринимаются механические колебания, распространяющиеся от него. При этом специальные методы и устройства требуются только для ОМП кабельных линий.

Акустический метод практически универсален. Им можно определять повреждения различного характера: однофазные и междупазные замыкания с различными переходными сопротивлениями; обрывы одной, двух или всех жил; в отдельных случаях возможно определение нескольких повреждений на одной КЛ. Метод с успехом применяется при отыскании повреждений на подводных участках КЛ. Применение акустического метода позволяет отыскать место замыкания одной жилы на оболочку. Если, однако, при этом переходное сопротивление не превышает нескольких десятков оМ, то найти МП во многих случаях не удастся.

Сущность акустического метода заключается в прослушивании над МП звуковых колебаний, вызванных искровым разрядом в канале повреждения. Конденсатор  $C$  заряжается от высоковольтной выпрямительной установки. Когда напряжение на нем достигнет напряжения пробоя разрядника  $P$ , последний пробьется и конденсатор  $C$  начнет разряжаться на поврежденную жилу кабеля. При этом в кабель посылается импульс высокого напряжения. Достигнув МП, этот импульс создаст искровое перекрытие с жилой кабеля на защитную оболочку. Искровой электрический разряд всегда сопровождается звуковым эффектом. Звуковые колебания, возникшие в месте искрового перекрытия, распространяются в окружающую среду и могут быть прослушаны на поверхности земли. По окончании разряда конденсатора разрядник гаснет, что позволяет конденсатору зарядиться снова для последующего разряда. Таким образом, схема обеспечивает периодическое повторение разрядов в МП. Звуки искровых разрядов достигают максимальной громкости над МП.

Звуковые колебания на поверхности земли могут быть прослушаны стетоскопом (рис. 5.13), который обеспечивает звукопроводящую связь между ухом оператора и поверхностью земли, исключая воздушную прослойку. Деревянный стержень стетоскопа хорошо проводит звуковые колебания. Иногда сила звуковых колебаний при искровом разряде оказывается недостаточной для непосредственного прослушивания. В таких случаях применяются акустические датчики с усилителями и индикаторами.

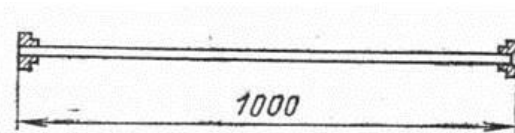


Рис. 5.13. Деревянный стетоскоп

Известно много конструкций акустических датчиков. Основой датчика является чувствительный элемент – преобразователь механических колебаний звукового частотного диапазона в электрические. Наиболее распространены пьезоэлектрические преобразователи, представляющие собою пластинку монокристалла титаната бария, сегнетовой соли или другого материала, имеющего высокий пьезоэффект. Последний заключается в образовании электрических зарядов на поверхности пластинки при ее механической деформации, например при изгибе. Для снятия этих зарядов с поверхности пластинка металлизируется.

В качестве электромеханических преобразователей применяются также электромагнитные звукосниматели, в частности электромагнитные микрофоны, например типа ДЭМ, хорошо экранированные от внешних помех. Для примера на рис. 5.14 показан разрез одного из акустических датчиков. Колебания грунта, даже незначительные, вызванные давлением, образованным в месте искрового разряда, передаются через корпус датчика на чувствительный элемент 1, что вызывает появление напряжения на его зажимах. Это напряжение подается на вход усилителя, а после усиления – на телефон или стрелочный индикатор. Большое значение имеет хороший контакт звукопроводящего стержня (цилиндра), на котором укреплен чувствительный элемент, с грузом 2. Для защиты элемента от внешних акустических помех, передаваемых по воздуху, в датчике предусмотрена акустическая изоляция 3 (например, на основе пористой резины). Электромагнитное экранирование достигается использованием металлических корпусов.

Механические волны испытывают отражения и преломления аналогично электромагнитным волнам, рассмотренным выше. Так, при переходе из плотного грунта в воздух коэффициент отражения составляет 0,96, а коэффициент преломления – только 0,04. Это означает, что лишь незначительная часть энергии волны может быть воспринята человеческим ухом. Деревянный стетоскоп позволяет поднять эту долю до 50...60 %. Зона слышимости искрового разряда зависит от энергии и характера разряда и акустических свойств среды вблизи МП.

Для создания искрового разряда в МП необходимо приложить к нему достаточное импульсное напряжение  $u_{\Pi}$ . Последнее зависит как от амплитуды посылаемого импульса  $u_0$ , так и от сопротивления  $R_{\Pi}$  в месте повреждения

$$u_{\Pi} / u_0 = 2R_{\Pi} / (2R_{\Pi} + z), \quad (5.9)$$

где  $z$  – волновое сопротивление кабеля.

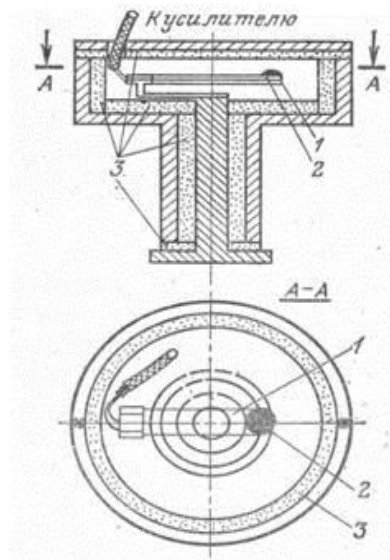


Рис.5.14. Конструкция акустического датчика

При снижении переходного сопротивления до значения волнового сопротивления кабеля начинается резкое уменьшение напряжения на искровом промежутке. Поэтому в случае малого переходного сопротивления в МП искровой разряд может и не возникнуть. При высоком напряжении пробоя, примерно равном испытательному напряжению кабеля  $u_{\text{п}} \approx u_{\text{исп}}$ , в изоляции кабеля создаются пробои без использования разрядника.

Если нельзя поднять напряжение на кабеле из-за большого тока, протекающего через МП, то необходимо выбрать разрядник с пробивным напряжением  $u_0 \approx u_{\text{исп}}$ . Это ограничение вызвано опасностью возникновения перенапряжений из-за удвоения амплитуды посылаемого импульса у разомкнутого конца в случае отсутствия пробоя МП, а также перенапряжений в связанной сети низкого напряжения, что может привести к повреждению низковольтной аппаратуры.

Следует иметь в виду, что при импульсном пробое возникает большое падение напряжения на заземлении, которое может привести к так называемому обратному перекрытию с заземления на низковольтную сеть. Во избежание этого конденсатор и другие элементы цепи импульсного разряда заземляют отдельным проводом с выносным заземлителем. Хорошая слышимость пробоев получается, когда в защитной оболочке кабеля имеется отверстие. Если при этом замеренное омметром переходное сопротивление будет очень мало  $R_{\text{п}} \approx 0$ , то это еще не означает, что искрового разряда не возникнет. Дело в том, что при большом по объему выгорании изоляции очередной пробой может легко разрушить образовавшийся канал с низким сопротивлением. С другой стороны, при металлическом сплавлении жилы с защитной оболочкой кабеля искровой разряд получить невозможно, если только спай не будет нарушен при прохождении импульса.

Фирма Seba dynatronic ограничивает применение акустического метода условием  $R_{\text{п}} \approx 10$  Ом. Однако опыту эксплуатации более соответствует необходимость переходного сопротивления порядка нескольких десятков Ом. Чем плотней и однородней грунт, расположенный над кабелем, тем лучше передача звуковых колебаний. Поэтому покровы из рыхлого снега, сухого песка, щебня, шлака и строительного мусора обуславливают резкое сокращение зоны слышимости. Наибольшую зону слышимости обеспечивают глинистые грунты, лед и монолитные бетонные покрытия. Акустический метод невозможно применить на кабелях, не имеющих отверстия в оболочке на МП, если кабель залегает на очень большой (больше 2...3 м) глубине или имеется звукопоглощающая среда в грунте над МП, при наличии прочного металлического мостика, а также при высокой изоляции оборванных жил.

Важнейшим показателем эффективности акустического метода является энергия разряда, Дж

$$W = C u_0^2 / 2, \quad (5.10)$$

где  $u_0$  – напряжение пробоя разрядника, кВ;  $C$  – емкость, разряжаемая на поврежденный кабель, мкФ.

При слишком малой емкости  $C$  акустический метод неэффективен. Это объясняется следующим. Длительность разряда определяется постоянной времени  $\tau = Cz$ . Поскольку для силовых кабелей  $z = 10...50$  Ом, то, приняв  $Z_{\text{ср}} = 30$  Ом, можно записать следующее условие:

$$C \geq \tau_{\min} / z_{CP} = \tau_{\min} / 30. \quad (5.11)$$

Если  $\tau_{\min}$  меньше времени пробега импульса по кабелю, то амплитуда импульса снижается по мере приближения к месту пробоя и тем более снижается акустическая энергия.

При  $l = 2500$  м и  $u = 160$  м/мкс время пробега составит 15 мкс, откуда  $C \approx 0,5$  мкФ. Опыт эксплуатации подтверждает необходимость использования емкости не менее 0,5 мкФ. Так как акустическая энергия увеличивается пропорционально  $u_0^2$ , то следует стремиться к максимальному подъему напряжения  $u_0$ , ограничивая его уровнем допустимых перенапряжений. Для низковольтных кабелей приходится увеличивать энергию в основном за счет емкости, используя батареи в десятки и даже сотни микрофард. Типичное значение энергии разряда для акустического метода лежит в диапазоне 200...1000 Дж. Эта энергия обеспечивается для КЛ 6...10 кВ при  $u_0 = 20$  кВ и  $C = 0,5...2,5$  мкФ, а для низковольтных КЛ – при  $u_0 = 2...3$  кВ и  $C = 20...100$  мкФ.

Перед началом ОМП акустическим методом необходимо знать зону его расположения, так как для кабелей длиной более 100 м прослушивание всей трассы нецелесообразно. Предполагаемое МП определяется дистанционным методом и отмечается на трассе. Зона поиска в зависимости от примененного метода и состояния документации может составлять до нескольких десятков метров.

Поиски наиболее удобно производить, установив пери-одичность искровых разрядов в кабеле, равную одному пробоя в 2...6 с. Поиски в зоне повреждения производятся путем установки акустического датчика на грунт или дорожное покрытие над трассой кабеля через каждые 1-2 м до достижения максимальной слышимости искровых разрядов. Если трасса кабеля точно не известна, то ее уточняют с помощью индукционной рамки, в которой наводится импульсное напряжение в момент разряда. Отыскивают трассу, как и при индукционном методе, с включением генератора по схеме жила-земля. С помощью этой же рамки легко установить наличие разрядов в кабеле и их периодичность.

Периодичность разрядов может нарушаться из-за обгорания электродов разрядника. Поэтому часто применяют трехэлектродные разрядники. При этом импульсы напряжения на поджигающий электрод подаются строго периодически от специального генератора. Кроме улавливания периодичности разрядов на трассе вблизи МП индукционной рамкой используют также прием звука пробоя разрядника по радиоканалу (радиотелефону).

Как показывает опыт, повысить помехоустойчивость акустического метода позволяет использование двухканального приемника, как это показано на рис. 5.15. Импульсный сигнал разряда, принятый индукционной рамкой 1 и усиленный в блоке 3, приводит к срабатыванию порогового устройства 5, которое запускает блок временной задержки 6 и открывает ключ 7 для передачи акустического сигнала от датчика 2 на усилитель 4. Через время задержки  $\Delta t$  ключ 7 закрывается. Если акустический сигнал возникнет в интервале времени между открытием и закрытием ключа 7, то сработает индикатор 8. Установив  $\Delta t \ll T$  (где  $T$  – периодичность повторения разрядов), резко увеличивают помехоустойчивость, так как интервал времени приема акустических помех сокращается.

В США для кабелей в металлических трубах нашли применение две разновидности акустического метода: «направление звука» и «измерение расстояния, пройденного звуком».

Метод «направление звука» использует разность времени распространения звуковых колебаний, вызванных дугой в МП, до двух акустических датчиков, установленных в разных точках линии. Первым сработает ближайший к МП датчик.

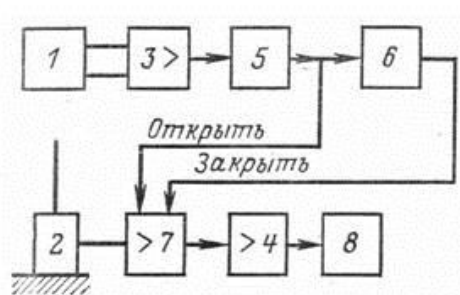


Рис. 5.15. Структурная схема двухканального приемника для акустического метода

При установке датчиков непосредственно на металлической трубе удастся улавливать звуковые колебания на расстоянии до 60 м от места пробоя. Перемещая датчики, находят МП с точностью до нескольких сантиметров.

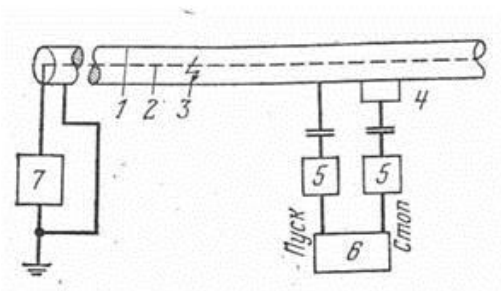


Рис. 5.16. Схема измерения расстояния, пройденного звуковой волной: 1 – металлическая труба кабеля; 2 – жила кабеля; 3 – место пробоя; 4 – акустический датчик; 5 – блоки пуска и останова счетчика; 6 – счетчик; 7 – высоковольтная выпрямительная установка

Вторая из указанных разновидностей акустического метода предусматривает измерение специальным счетчиком (или с помощью осциллографа) интервала времени от момента прихода по трубе электрического импульса до момента прихода звукового импульса при пробое в МП. Так как электрический импульс распространяется вдоль трубы значительно быстрее звукового, то измеренное время практически равно времени распространения звука. Если измерения производить на двух стойках, вбитых в землю над трубой в 2 м от нее и на расстоянии 3...8 м друг от друга, то можно определить, в каком направлении находится МП, и расстояние до него. Перемещая стойки, можно приблизиться к МП. Можно также рассчитать расстояние до МП, если проводить измерения в колодцах с обеих сторон от этого места.

Принципиальная схема измерения с применением электронного счетчика приведена на рис. 5.16. Электрический импульс, распространяющийся по трубе, запускает счетчик, а остановка которого происходит после прихода звукового импульса. Скорость распространения звука по стальной трубе составляет 3874 м/с. Для усилителей акустического сигнала непригодна узкая полоса (несколько десятков герц) селективных усилителей индукционных приемников.

Универсальный индикатор типа 81018 фирмы Robotron Messelektronik «Otto Schon» (ФРГ) кроме диапазонов для приема индукционных сигналов имеет два диапазона для акустических сигналов: 50...500 Гц при использовании пьезоэлектрического микрофона и 100...2000 Гц при использовании электродинамического микрофона. Универсальный приемник фирмы Seba dynatronic (ФРГ) имеет для усиления акустических сигналов канал с полосой 100...7000 Гц. Эта же фирма использует разные датчики: для рыхлого грунта массой 1,7 кг и для твердого грунта датчик – 8 кг.

Широкополосные усилители (полоса 400...700 Гц и более) могут использоваться для переключения с индукционной рамки на акустический датчик.

Индукционная рамка для приема импульсов тока акустического разряда должна подключаться к тракту усиления с полосой не менее нескольких сотен герц. Комбинированное (универсальное) приемное устройство для индукционного и акустического метода ОМП должно иметь либо специализированные частотные диапазоны, либо отдельные усилители с разной полосой пропускания.

В отечественных испытательно-прожигательных установках для образования импульсов акустического разряда используются те же выпрямительные устройства, что и для прожигания дефектной изоляции.

Фирма Seba dynatronic выпускает специальные установки для получения импульсов акустического разряда. Эти установки для КЛ до 15 кВ выполняются на энергию импульсов 250, 400, 600, 800 и 1000 Вт·с и имеют по три ступени напряжения в диапазоне от 2,5 до 24 кВ. Масса установок – 20...85 кг.

## 6. РЕМОНТ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

### 6.1. Общие указания по ремонту

Во время эксплуатации кабельных линий по определенным причинам кабели, а также соединительные муфты и концевые заделки выходят из строя. Основные причины повреждения кабельных линий напряжением 1...10 кВ следующие:



- предшествующие механические повреждения – 43 %;
- непосредственные механические повреждения строительными и другими организациями – 16 %;
- дефекты в соединительных муфтах и концевых заделках во время монтажа – 10 %;
- повреждение кабеля и муфт в результате осадки грунта – 8 %;
- коррозия металлических оболочек кабелей – 7 %;
- дефекты изготовления кабеля на заводе – 5 %;
- нарушения при прокладке кабеля – 3 %;
- старение изоляции из-за длительной эксплуатации или перегрузок – 1 %;
- прочие и неустановленные причины – 7 %.

В соответствии с требованиями Инструкции по эксплуатации силовых кабельных линий предусмотрен текущий или капитальный ремонт кабельных линий напряжением до 35 кВ. Текущий ремонт может быть аварийным, срочным и плановым.

Аварийный ремонт необходим в том случае, когда после отключения кабельной линии потребители всех категорий остались без напряжения и нет возможности подать напряжение по кабелям высокого или низкого напряжения, в том числе по временным шланговым кабелям, или когда резервная линия, на которую передана нагрузка, недопустимо перегружена и требуется ограничение потребления. К аварийному ремонту приступают немедленно и выполняют его непрерывно, чтобы в минимально кратчайший срок включить кабельную линию.

В больших городских кабельных сетях и на крупных промышленных предприятиях для этого сформированы аварийно-восстановительные службы из бригады или нескольких бригад, которые дежурят круглосуточно и по указанию диспетчерской службы немедленно выезжают на место аварии.

Срочный ремонт необходим, если приемники первой или второй категории лишаются автоматического резервного питания, а оставшиеся кабельные линии перегружены, что ведет к ограничению потребления. По указанию руководства энергослужбы ремонтные бригады приступают к срочному ремонту кабельных линий в течение рабочей смены.

Плановый ремонт выполняется по плану-графику, утвержденному руководством энергослужбы. План-график ремонтов кабельных линий составляется ежемесячно на основе записей в журналах обходов и осмотров, результатов испытаний и измерений, а также по данным диспетчерских служб.

Капитальный ремонт кабельных линий производится по годовому плану, разрабатываемому ежегодно в летний период для следующего года на основе данных эксплуатации. При составлении плана капитального ремонта учитывается необходимость внедрения новых, более современных типов кабелей и кабельной арматуры. Планируются ремонт кабельных сооружений и ликвидация неисправности освещения, вентиляции, противопожарных средств, устройств по откачке воды. Учитывается также необходимость частичной замены кабелей на отдельных участках, лимитирующих пропускную способность линий или не удовлетворяющих требованиям термической стойкости в изменившихся условиях работы сети при возросших токах короткого замыкания.

Ремонт находящихся в эксплуатации кабельных линий выполняется непосредственно самим эксплуатационным персоналом или персоналом специализированных электромонтажных организаций. При ремонте эксплуатируемых кабельных линий выполняются следующие работы:

- отключение кабельной линии и ее заземление, ознакомление с документацией и уточнение марки и сечения кабеля, выписка наряда-допуска по технике безопасности, погрузка материалов и инструмента, доставка бригады на место работы;

- выполнение шурфов, раскопка котлованов и траншей определение ремонтируемого кабеля, ограждение рабочего места и мест раскопок, определение кабеля в РП (ТП) или в кабельных сооружениях, проверка отсутствия горючих и взрывоопасных газов, получение разрешения на огневые работы;

– допуск бригады, прокол кабеля, разрезание кабеля или вскрытие муфты, проверка изоляции на наличие влаги, отрезание участков поврежденного кабеля, установка палатки;

– прокладка ремонтной кабельной вставки;

– ремонт кабельной муфты – разделка концов кабеля, фазировка кабелей, монтаж соединительных муфт (или муфты и заделки);

– окончание работ – закрытие дверей РУ, ТП, кабельных сооружений, сдача ключей, засыпка котлованов и траншей, уборка и погрузка инструмента, доставка бригады на базу, составление исполнительного эскиза и внесение изменений в документацию кабельной линии, отчет об окончании ремонта;

– измерения и испытания кабельной линии.

В целях ускорения ремонтных работ на кабельных линиях должны применяться пневматические отбойные молотки, электромолотки, бетоноломы, экскаваторы, средства для отогрева мерзлого грунта.

Ремонтные работы кабельных линий бывают простыми, не требующими больших трудозатрат и времени, и сложными, продолжающимися несколько дней. К простым относятся, например, такие, как ремонт наружных покровов (джутового покрова, поливинилхлоридного шланга), покраска и ремонт бронелент, ремонт металлических оболочек, ремонт концевых заделок без демонтажа корпуса и т. п. Простые ремонты выполняются в одну смену одной бригадой (звеном).

Сложнее ремонты предусматривают замену большой длины кабеля в кабельных сооружениях с предварительным демонтажом вышедшего из строя кабеля или прокладку в земле нового кабеля на участке длиной несколько десятков метров (в редких случаях – и сотен метров). Выполнение ремонтов затрудняет прокладка кабельной трассы по сложным участкам со многими поворотами, с пересечением шоссе дорог и инженерных коммуникаций, большая глубина залегания кабеля, также необходимость отогревать землю в зимнее время. При выполнении сложных ремонтов прокладывается новый участок кабеля (вставка) и монтируются две соединительные муфты.

Сложные ремонты выполняются одной или несколькими бригадами, а при необходимости – круглосуточно и с применением землеройных механизмов и других средств механизации. Сложные ремонты выполняются или силами энергослужбы предприятия (городских сетей), или с привлечением специализированных организаций по монтажу и ремонту кабельных линий.

## 6.2. Ремонт защитных покровов

**Ремонт наружного джутового покрова.** Содранную пропитанную кабельную пряжу протянутого через трубы, блоки или другие препятствия кабеля, необходимо восстанавливать. Ремонт выполняется подмоткой смоляной лентой в два слоя с 50 %-ным перекрытием с последующей промазкой этого участка разогретой битумной мастикой МБ-70 (МБ-90).

**Ремонт поливинилхлоридного шланга и оболочек.** Ремонт поливинилхлоридного шланга или оболочек проводят с помощью сварки, в струе горячего воздуха (при температуре 170... 200 °С) с применением сварочного пистолета с электрическим подогревом воздуха, как показано на рис. 6.1, газоздушного – на рис. 6.2. Сжатый воздух при этом подводится под давлением  $0,98 \cdot 10^4$  Па от компрессора, баллона со сжатым воздухом или переносного блока с ручным насосом.

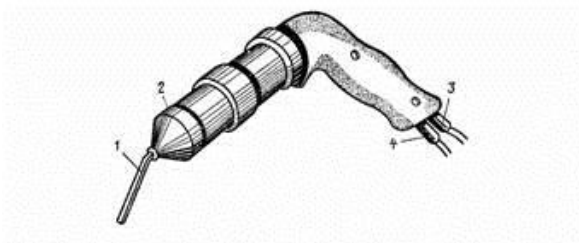


Рис 6.1. Сварочный пистолет ПС-1 с электрическим подогревом: 1 – сопло для выхода горячего воздуха; 2 – нагревательная воздушная камера;

3 – штуцер для подачи сжатого воздуха; 4 – электропровод

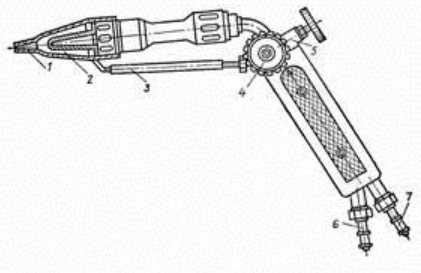


Рис. 6.2. Газовоздушный пистолет: 1 – сопло для выхода горячего воздуха; 2 – нагревательная воздушная камера; 3 – резиновая трубка; 4 – кран для воздуха;

5 – кран для пропан-бутана; 6 – штуцер для подачи сжатого воздуха; 7 – штуцер для подачи пропан-бутана

В качестве присадки при сварке применяется поливинилхлоридный пруток диаметром 4...6 мм.

Перед сваркой места, подлежащие ремонту, необходимо очистить и обезжирить бензином, кабельным ножом вырезать посторонние включения и срезать в местах повреждения шланга выступающие края и задиры.

Для ремонта проколов небольших отверстий и раковин место повреждения в шланге или оболочке и конец присадочного прутка прогревают в течение 10...15 с струей горячего воздуха, затем струю отводят, а конец прутка прижимают и приваривают к шлангу в месте разогрева. После охлаждения, убедившись в прочности приварки прутка легким его подергиванием, пруток отрезают. Для герметизации и выравнивания сварочного шва место ремонта прогревают до появления признаков плавления, после этого к разогретому месту прижимают рукой кусок кабельной бумаги, сложенной в 3 – 4 слоя. Для надежности операцию повторяют 3 – 4 раза. Для ремонта шланга, имеющего щели, прорезы и вырезы, конец присадочного прутка приваривают к целому месту шланга на расстоянии 1 – 2 мм от места повреждения. Убедившись в прочности приварки, направляют струю воздуха так, чтобы одновременно прогревались нижняя часть присадочного прутка и обе стороны прорезы или щели. Легким усилием нажимая на пруток, последний укладывают и приваривают вдоль щели или прорезы. Приварку прутка заканчивают на целом месте на расстоянии 1 – 2 мм от повреждения. Затем ножом срезают выступающие поверхности прутка и производят выравнивание сваренного шва.

Разрывы шланга или оболочки ремонтируют с применением поливинилхлоридных заплат или разрезанных манжет. Заплата изготавливается из пластика так, чтобы края ее на 1,5 – 2 мм перекрывали место разрыва. Заплату по всему периметру приваривают к шлангу, а затем вдоль образовавшегося шва приваривают присадочный пруток, а выступающие поверхности прутка срезают и выравнивают шов в месте сварки.

Для ремонта шланга или оболочки с применением разрезной манжеты кусок поливинилхлоридной трубки отрезают на 35...40 мм выше поврежденного места, разрезают трубку вдоль и надевают ее на кабель симметрично месту повреждения. Манжету временно закрепляют поливинилхлоридной или миткалевой лентой с шагом 20...25 мм, приваривают конец прутка в месте стыка манжеты со шлангом (оболочкой), а затем укладывают и приваривают пруток вокруг торца манжеты. После приварки обоих торцов манжеты к шлангу (оболочке) снимают ленты временного крепления, приваривают пруток вдоль разреза манжеты, срезают выступающие поверхности прутка и производят окончательное выравнивание всех сварных швов.

Ремонт поливинилхлоридных шлангов и оболочек кабелей может выполняться также с применением эпоксидного компаунда и стеклоленты. Поверхность шланга или оболочки предварительно обрабатывают, как указано выше, и с помощью драчевого напильника добиваются ее шероховатости. Место повреждения и за его краями на расстоянии 50...60 мм в обе стороны смазывают эпоксидным компаундом с введенным в него отвердителем. По слою эпоксидного компаунда накладываются 4 – 5 слоев стеклоленты, каждый из которых также промазывают слоем компаунда.

Временный ремонт шлангов и оболочек в целях предотвращения проникновения влаги под оболочку кабеля, а также вытекания битумного состава из-под шланга разрешается выполнять с помощью липкой поливинилхлоридной ленты с 50 % -ным перекрытием в три слоя с промазкой верхнего слоя

поливинилхлоридным лаком № 1. По второму способу временный ремонт выполняется лентой ЛЭТСАР в три слоя с 50 %-ным перекрытием.

**Покраска бронелент.** Если бронепокровов кабеля разрушен коррозией, выполняют его покраску. Рекомендуются применять термостойкие пентафталевые лаки ПФ-170 или ПФ-171 либо термостойкую маслобитумную краску БТ-577. Покраску выполняют с применением краскораспылителя, а при его отсутствии – кистью.

**Ремонт бронелент.** Обнаруженные на открыто проложенных кабелях участки разрушенных бронелент обрезают и удаляют. В местах отрезанных лент выполняют временные бандажи. Рядом с временными бандажами обе ленты тщательно зачищают до металлического блеска и облуживают припоем ПОССу 30-2, после чего провод заземления закрепляют бандажами из оцинкованной проволоки диаметром 1 – 1,4 мм и припаивается этим же припоем. Сечение проводника заземления выбирают в зависимости от сечения жил кабеля, но оно должно быть не менее 6 мм<sup>2</sup>.

При облуживании и пайке бронелент применяют паяльный жир. Продолжительность каждой пайки должна составлять не более 3 мин. Временные бандажи удаляют. На оголенный участок оболочки наносят антикоррозионное покрытие.

В тех случаях когда возможны механические воздействия на ремонтируемый участок кабеля, на него дополнительно наматывают по повиву один слой бронеленты, предварительно демонтируемый с отрезка кабеля с неповрежденной броней. Ленту наматывают с 50 %-ным перекрытием и закрепляют бандажами из оцинкованной проволоки. Проводник заземления в этом случае по всей длине перемычки должен быть распущен в целях создания плотного облегания брони вокруг участка ремонтируемого кабеля.

### 6.3. Ремонт металлических оболочек

Если при повреждении оболочки кабеля (трещины, проколы) обнаружена течь маслоканифольного состава на этом участке, с обеих его сторон на расстоянии 150 мм от места повреждения удаляют оболочку. Верхний слой поясной изоляции снимают и проверяют на влажность в разогретом парафине.

В том случае если влага отсутствует и изоляция не разрушена, свинцовую или алюминиевую оболочку ремонтируют.

Из листового свинца толщиной 2...2,5 мм вырезают полосу шириной на 70...80 мм выше оголенного участка кабеля и длиной на 30...40 мм больше длины окружности кабеля по оболочке. В полосе выполняют два заливочных отверстия с таким расчетом, чтобы они располагались над отделенной частью кабеля. Полосу тщательно очищают от пыли и грязи ветошью, смоченной в бензине.

Удаленный полупроводящий слой бумаги и верхнюю ленту поясной изоляции восстанавливают и закрепляют бандажами из хлопчатобумажных ниток. Участок прошпаривают кабельной массой МП-1.

Полосой свинца обертывают оголенное место кабеля так, чтобы она заходила равномерно на края оболочки кабеля, а края образовавшейся свинцовой трубы перекрывали друг друга не менее чем на 15...20 мм. Вначале производят пропайку припоем ПОССу 30-2 продольного шва, а затем торцы трубы подгибают к оболочке кабеля и припаивают к ней.

Для кабелей с алюминиевой оболочкой в месте припайки свинцовой трубы оболочку кабеля облуживают припоем марки А. Муфту заливают горячей кабельной массой МП-1. После остывания и доливки запаивают заливочные отверстия. На запаянное на торцах место накладывают бандаж из медной проволоки виток к витку диаметром 1 мм с выходом 10 мм на оболочку кабеля и припаивают к оболочке. Отремонтированное место покрывают смоляной лентой в два слоя с 50 %-ным перекрытием.

В том случае если влага проникла под оболочку или повреждена поясная изоляция, а также изоляция жил, участок кабеля вырезают по всей длине, где обнаружена влага или повреждения изоляции. Затем вставляют отрезок кабеля необходимой длины и проводят монтаж двух соединительных муфт. Сечение и напряжение кабеля должны соответствовать вырезанному участку.

Марка кабеля для вставки может быть другой, но аналогичной вырезанному участку.

#### 6.4. Восстановление бумажной изоляции

В тех случаях когда повреждены не токопроводящие жилы, а изоляция жил и поясная изоляция, а влага в ней отсутствует, изоляцию восстанавливают с последующим монтажом разрезной свинцовой соединительной муфты.

Кабель раскрывают до такой длины, чтобы можно было создать его достаточную слабины для разведения жил между собой. После разведения жил и удаления старой изоляции восстанавливают изоляцию жил с помощью наложения бумажных роликов или лентой ЛЭТСАР с предварительной обработкой прошпарочной массой МП-1. Устанавливают разрезную свинцовую муфту и пропаяивают сначала продольный шов, а затем припаивают муфту к оболочке кабеля.

Такой ремонт можно выполнять на горизонтальных участках кабельных трасс, где отсутствует повышенное давление масла, так как муфта с продольной пайкой имеет меньшую механическую прочность.

#### 6.5. Ремонт токопроводящих жил

Если разрыв жил кабеля произошел на незначительной длине и его можно подтянуть за счет «змейки», выполненной при прокладке, производят обычный ремонт соединительной свинцовой или эпоксидной соединительной муфты. Если запаса длины кабеля нет, можно применять удлиненные соединительные гильзы и муфты. Ремонт в этом случае производят с одной соединительной свинцовой муфтой. Во всех остальных случаях при ремонте токопроводящих жил кабеля применяют вставку кабеля и выполняют монтаж двух соединительных свинцовых или эпоксидных муфт.

#### 6.6. Ремонт соединительных муфт

Ремонт соединительной муфты или монтаж вставки кабеля и двух соединительных муфт проводят после осмотра муфты и ее разборки.

Если пробой произошел с места пайки жилы или с гильзы на корпус свинцовой муфты и разрушение незначительное и изоляция не увлажнена, производят последовательную разборку муфты и поврежденной части изоляции. Затем изоляцию восстанавливают бумажными роликами или лентой ЛЭТСАР и прошпаривают массой МП-1. Устанавливают разрезной корпус муфты и выполняются все дальнейшие операции по монтажу муфты.

Если пробой произошел в шейке муфты с жилы на край оболочки и изоляция не увлажнена, муфту разбирают, затем отрезают участок брони и оболочки на длину, необходимую для удобного разведения жил. Изоляцию поврежденной жилы восстанавливают и прошпаривают. Устанавливают удлиненный разрезной корпус свинцовой муфты и выполняют все операции по монтажу муфты.

Если разрушения значительны, то применяют вставку кабеля с монтажом двух муфт по технологии, предусмотренной технической документацией.

В большинстве случаев повреждения в соединительных муфтах происходят при профилактических испытаниях повышенным напряжением. И если к ремонту не приступить сразу же после определения места повреждения, в муфту начнет поступать влага. В этом случае вырезают дефектную муфту и участки кабеля. Как правило, чем дольше находится в земле поврежденная и не отремонтированная муфта, тем длиннее будет вставка кабеля при ремонте кабельной линии.

#### 6.7. Ремонт концевых муфт наружной установки

Концевые муфты наружной установки в основном выходят из строя в дождливые периоды времени года или при большой относительной влажности воздуха. Поврежденную муфту необходимо обрезать, проверить изоляцию кабеля на влажность и, если бумажная изоляция не увлажнена, выполнить монтаж муфты в соответствии с требованиями технической документации. Если длина кабеля в конце линии имеет достаточный запас, то ремонт ограничивается монтажом только концевой муфты. Если же запаса кабеля недостаточно, то на конце кабельной линии выполняют вставку кабеля необходимой длины. В этом случае необходимо монтировать соединительную и концевую муфты.

В концевых муфтах наружной установки с металлическим корпусом 1 раз в год в течение всего времени эксплуатации проверяют уплотнения и подтягивают гайки. Одновременно осматривают контактные соединения и в случае необходимости очищают контактные поверхности и подтягивают болты.

Систематически окрашивают эмалью места пайки, швы армировки и уплотнений. Поверхность концевых эпоксидных муфт наружной установки необходимо в процессе эксплуатации (1 раз в 3...5 лет в зависимости от местных условий) красить эмалями воздушной сушки. Окраску выполняют в сухую погоду, предварительно очистив поверхность муфты и изоляторов.

Изоляторы концевых муфт наружной и внутренней установок, а также изоляционные поверхности концевых заделок необходимо периодически очищать от пыли и грязи, смоченной в бензине тканью, не оставляющей ворсинок. Более частой очистке должна подвергаться концевая кабельная арматура в цехах промышленных предприятий и зонах с проводящей пылью. Периодичность протирки и очистки концевой кабельной арматуры на данной электроустановке устанавливает главный инженер местного энергопредприятия.

#### 6.8. Ремонт концевых заделок

При разрушении корпуса заделки и выгорании жил в корешке их ремонтируют так же, как и концевые муфты. При этом корпус заделки и детали нельзя использовать повторно.

Ремонт концевых заделок в стальных воронках при разрушении изоляции жил выполняют в следующей последовательности: разрушенную или пришедшую в негодность изоляцию жил (загрязнение, увлажнение) удаляют, сматывают один слой бумажной изоляции, производят подмотку в пять слоев с 50 %-ным перекрытием липкой поливинилхлоридной лентой или тремя слоями прорезиненной ленты с последующим покрытием изоляционными лентами или красками. Ремонт может быть выполнен и с применением лент ЛЭТСАР (два слоя) и ПВХ (один слой). При растрескивании, отслаивании, частичном уходе и значительном загрязнении заливочного состава, особенно когда эти дефекты сопровождаются заметным смещением жил между собой или к корпусу воронки (что может в свою очередь вызываться неправильным положением или отсутствием распорной пластины), следует произвести полную перезаливку стальной воронки.

Старый заливочный состав удаляют (выплавляется), воронку опускают вниз и очищают от копоти и грязи. После подмотки нового уплотнения (под воронку) воронку ставят на место.

Горловину воронки подматывают смоляной лентой, затем воронку вместе с кабелем прикрепляют к опорной конструкции хомутом. Проверяют правильность положения фарфоровых втулок, а затем используют заливочный состав.

Ремонт концевых заделок из поливинилхлоридных лент производят при попадании пропиточного состава в корешок или на жилы, при растрескивании и обрывах лент. Проводят демонтаж старых лент и подмотку на жилах новых лент ПВХ или ЛЭТСАР.

Ремонт эпоксидных концевых заделок при разрушении подмоток на жилах выполняют с демонтажом старых лент, восстановлением новых лент ЛЭТСАР и дополнительной подливкой эпоксидного компаунда с таким расчетом, чтобы ленты заходили в заливаемый компаунд не менее чем на 15 мм.

При течи пропитывающего состава по кабелю в корешке заделки обезжиривают нижнюю часть заделки на участке 40...50 мм и на таком же расстоянии участок брони или оболочки (для небронированных кабелей). На обезжиренный участок корпуса заделки и примыкающий к нему участок кабеля шириной 15...20 мм накладывают двухслойную подмотку из смазанной эпоксидным компаундом хлопчатобумажной ленты. Заливку ремонтной формы (рис. 6.3) производят эпоксидным компаундом.

При нарушении герметичности в месте выхода жил из корпуса заделки обезжиривают верхнюю плоскую часть корпуса заделки и участки трубок или подмотки жил длиной 30 мм, примыкающие к корпусу. Устанавливают съемную ремонтную форму (рис. 6.4), размеры которой выбирают в зависимости от типоразмера заделки. Форму заливают компаундом. При нарушении герметичности на жилах обезжиривают дефектный участок трубки или подмотки жилы и накладывают ремонтную двухслойную подмотку из хлопчатобумажных лент с обильной обмазкой эпоксидным компаундом каждого витка обмотки или ленту ЛЭТСАР в три слоя.

При нарушении герметичности в месте примыкания трубки или подмотки к цилиндрической части наконечника обезжиривают поверхность бандаж и участок трубки или подмотки жилы длиной 30 мм. На обезжиренные участки накладывают двухслойную подмотку из хлопчатобумажных лент с обильной обмазкой компаундом каждого витка подмотки. Поверх подмотки накладывают плотный бандаж из крученого шпагата и обмазывают эпоксидным компаундом.

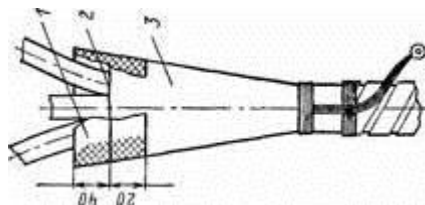


Рис. 6.4. Установка ремонтной формы для устранения течи в месте выхода жил из корпуса заделки:

1 – ремонтная форма; 2 – место течи; 3 – корпус заделки

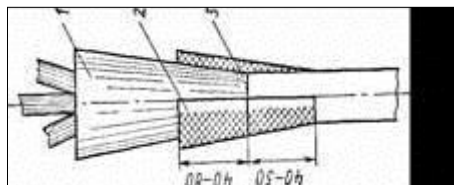


Рис. 6.3. Установка ремонтной формы для устранения течи пропитывающего состава в месте ввода кабеля в корпус заделки:

1 – корпус заделки; 2 – ремонтная форма; 3 – место течи

## 6.9. Ремонт кабельных линий 0,38...10 кВ

При выводе кабельной линии в ремонт следует определить характер и место повреждения. В зависимости от характера повреждения производится либо ремонт защитных покровов, либо ремонт бумажной изоляции и токопроводящих жил с монтажом соединительных и концевых муфт с последующей фазировкой и испытанием повышенным напряжением.

Для ремонта сухих заделок необходимо удалить обесцвеченные или растрескавшиеся ленты, проверить бумажную изоляцию на отсутствие влаги и наложить новые ленты, укрепив их бандажами. Рекомендации по применению способов оконцевания, соединения и ответвления алюминиевых жил кабелей до 10 кВ приведены в табл. 6.1, а медных жил – в табл. 6.2.

Конструкции соединительных гильз и наконечников показаны на рис. 6.5.

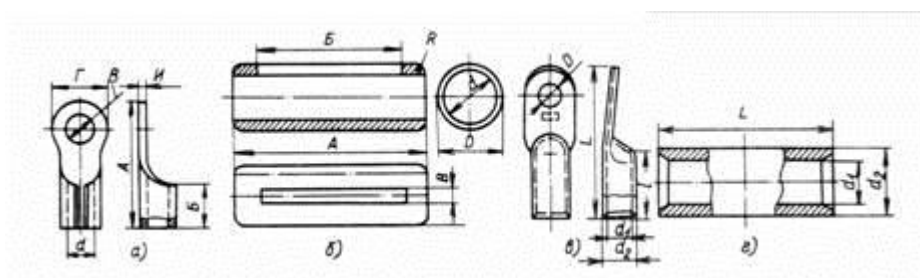


Рис. 6.5. Соединительные гильзы и наконечники: а – медный наконечник типа П; б – медная соединительная гильза для пайки; в – медный наконечник, закрепляемый опрессовкой;

г – медная гильза, закрепляемая опрессовкой

Для соединения и оконцевания медных и алюминиевых жил широко применяются различные прессы, выпускаемые промышленностью. Для опрессовки выбирают соответствующие наконечники или гильзы, пуансоны и матрицы. С концов жил снимают изоляцию на длину цилиндрической части наконечника или на половину длины гильзы. Секторные однопроволочные жилы скругляют с помощью прессов или клещей для скругления, многопроволочные жилы – с помощью плоскогубцев. Для алюминиевых жил применяют алюминиевые трубчатые гильзы и трубчатые алюминиевые наконечники типа ТА или ТАМ (медная контактная часть). Внутреннюю часть наконечников и гильз протирают, зачищают и смазывают кварцевой пастой. Также готовят жилы, после чего на них надевают наконечники или гильзы. Опрессовку для наконечников выполняют в один прием двузубым инструментом, в два приема – однозубым; гильзу спрессовывают в два приема двузубым инструментом и в четыре приема – однозубым.

Оконцевание алюминиевых однопроволочных жил выполняют также с помощью пиротехнических прессов ППО-95 и ППО-240; пуансоны и матрицы подбирают по сечениям жил. Изоляцию с жил снимают на длине 45 мм для кабелей сечением 25 мм<sup>2</sup>; 50 мм для 35...95 мм<sup>2</sup>; 55 мм для 120...240 мм<sup>2</sup>.

Для опрессовки медных жил применяют медные гильзы и медные трубчатые наконечники. Жилы, гильзы и наконечники зачищают. На жилах наконечники спрессовываются одним вдавливанием, а гильза – одним с каждой стороны.

Наиболее распространенными способами соединения и оконцевания жил кабелей до 10 кВ являются пайка и опрессовка, т. е. способы, которые можно применить как при ремонте кабельных линий, так и в РУ.

Соединяют жилы между собой и жилой с наконечником с помощью расплавленного припоя. Многопроволочные жилы для облегчения надевания на них наконечников, гильз или стальных форм обжимают с помощью универсальных плоскогубцев. Однопроволочные жилы скругляют с помощью прессов или специальных обжимных клещей. С концов жил снимают изоляцию на длине половины гильзы или стальной формы плюс 10 мм.

Медные жилы паяют в медных облуженных гильзах оловянно-свинцовыми припоями с применением флюсов путем сплавления припоя непосредственно или путем налива расплавленного припоя в гильзы. При сплавлении припоя пламенем горелки нагревают гильзу с введенными в нее облуженными медными жилами и обильно смазанными флюсом, затем вводят палочку припоя в пламя горелки и заполняют гильзу расплавленным припоем.

Таблица 6.1

**Область применения способов оконцевания и соединения  
алюминиевых жил кабелей до 10 кВ [13]**

Вид работы, способ выполнения	Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Рекомендации по применению
<b>Оконцевание</b>		
Опрессовка трубчатыми наконечниками ТА и ТАМ и штифтовыми наконечниками ШП	16-240	Следует применять
Штамповка наконечника из однопроволочной жилы пороховым прессом	25-240	<b>Рекомендуется</b>
Пайка наконечниками П	16-240	Следует применять
Пропано-кислородная сварка пластинами из сплава АД3-1Т1	50-240	Рекомендуется
Электродуговая сварка в защитном газе наконечниками ШАС	16-240	<b>Допускается</b>
<b>Соединение</b>		
Опрессовка трубчатыми гильзами	16-240	<b>Рекомендуется до 1 кВ.</b>  <b>Допускается 6–10 кВ</b>

Вид работы, способ выполнения	Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Рекомендации по применению
<i>Термитная сварка соединением жил встык</i>	16-240	<b>Следует применять</b>
<i>Пайка способом полива</i>	16-240	<b>То же</b>
<i>Пайка сплавлением припоя</i>	16-240	<b>Рекомендуется</b>
<i>Пропано-кислородная сварка в</i>	16-240	<b>Следует применять</b>



При втором способе стальной ковш с припоем в количестве 8...10 кг разогревают до температуры 245...270° С и устанавливают под местом пайки. Металлической ложкой припой из ковша заливают несколько раз в гильзы, тем самым разогревая их до температуры припоя.

Таблица 6.2

Область применения способов оконцевании и соединения медных жил кабелей до 10 кВ [13]

Вид работы, способ выполнения	Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Рекомендации по применению
Оконцевание		
Опрессовка трубчатыми наконечниками	4-240	Следует применять
Пайка наконечниками П	1.5-240	То же
Пайка многопроволочной жилы с образованием монолита при втычном наконечнике	16-240	Допускается  до 1 кВ
Соединение		
Опрессовка трубчатыми гильзами	16-240	Следует применять
Пайка гильз	4-240	Рекомендуется

*Примечание.* Рекомендации по применению означают (в соответствии с ПУЭ): *следует применять* – данное требование является преобладающим; *рекомендуется* – данное решение является одним из лучших, но не обязательным; *допускается* – данное решение применяется в виде исключения, как вынужденное.

Алюминиевые жилы между собой паяют цинко-оловянным или оловянно-медно-цинковым припоем. Жилы перед пайкой подготавливают либо ступенчатой разделкой по повивам для соединения в гильзах, либо в стальных формах со срезом жилы под углом 55°. Жилы однопроволочного исполнения подготавливают только со срезом под углом 55° (рис. 6.6).

Ступенчатая разделка жил по повивам (рис. 6.6) проводится с соблюдением следующих условий:

Сечение жил, мм <sup>2</sup>	16...35	50...95	120...240
Количество ступеней	1	2	3
Длина участка жилы, очищен- ной от изоляции, мм <sup>2</sup> ...	50	60	70

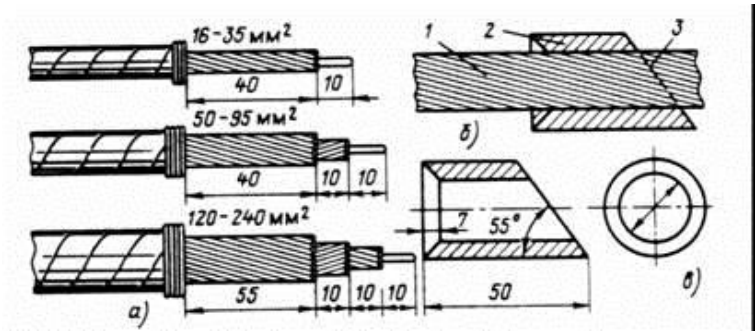


Рис.6.6. Подготовка алюминиевых многопроволочных жил под пайку:

Для соединения в гильзах или в стальных разъемных формах концы жил обслуживают припоем марки «А» методом натирания, а затем оловянно-свинцовым (рис. 6.7). Края изоляции обматывают асбестовым шнуром для защиты ее от обугливания. Перед пайкой рекомендуется устанавливать защитные экраны и подматывать асбестовый шнур. Пайку выполняют методом сплавления припоя в гильзу или форму, нагревая их пламенем горелки. Стальной мешалкой перемешивают припой и удаляют шлаки.

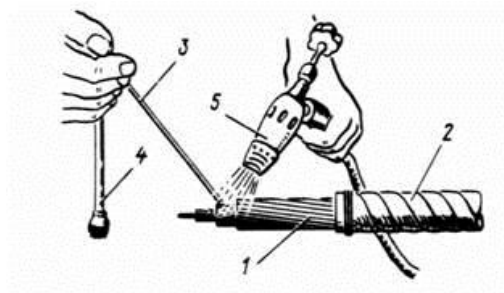


Рис. 6.7. Облуживание жилы припоем:

*1* – алюминиевая многопроволочная жила со ступенчатой разделкой; *2* – изоляция; *3* – палочка припоя; *4* – металлическая кисточка; *5* – горелка

Пайка методом полива предварительно разогретого припоя в чугунных тиглях осуществляется в стальных разъемных формах. Тигель с расплавленным припоем ЦО-12 располагается вблизи пайки. Лоток из стали прикрепляют к жилам и опускают на край тигля, с тем чтобы в результате полива металлической ложкой припой после прогрева стальной формы сливался в тигель. В результате жилы разогреваются до температуры 500...550 °С и размягчаются (рис. 6.8).



Рис. 6.8. Соединение жил пайки поливом расплавленного припоя:

*1* – ложка паяльная; *2* – форма; *3* – лоток; *4* – тигель; *5* – скребок

Одновременно с размягчением торцов жил, срезанных под углом 55°, с них снимают скребком пленку окиси. Тигель с количеством припоя 7...8 кг разогревают перед пайкой каждой жилы, так как он быстро остывает. При количестве припоя в тигле до 15...18 кг разогрев производят 1 раз. Алюминиевые жилы со срезом под углом 55° располагают в формах на расстоянии 2 мм друг от друга для снятия пленки окиси со всей поверхности косого среза, благодаря чему увеличивается площадь пайки и повышается ее качество.

Для соединения алюминиевых жил с медными применяют или медные облуженные гильзы, или стальные разъемные формы. Алюминиевые жилы предварительно облуживают припоем марки «А», а затем оловянно-свинцовым. Таким же припоем выполняется и пайка. При пайке припоем ЦО-12 в стальных формах медная жила предварительно облуживается оловянно-свинцовым припоем, алюминиевая жила обрезаается под углом 55° (рис. 6.6).

Для оконцевания медных и алюминиевых жил применяют медные облуженные наконечники типа П. Изоляцию с жил снимают на длину цилиндрической части наконечника плюс 10 мм. Многопроволочные секторные жилы скругляют универсальными плоскогубцами, а однопроволочные – прессом или клещами для скругления. На медные жилы надевают наконечник, уплотняют асбестовым шнуром, вводят флюс и прогревают наконечник пламенем горелки. Затем оловянно-свинцовый припой вводят в разогретый наконечник. Припой, расплавляясь, заполняет все пространства между проволоками жилы и наконечником.

Многопроволочные алюминиевые жилы перед пайкой облуживают натирочным припоем марки «А», затем – оловянно-свинцовым. Пайку алюминиевых жил выполняют так же, как и медных. Второй способ – используют в основном для пайки однопроволочных жил. Концы жил срезают под углом 55°, надевают наконечник на жилу, выполняют уплотнение снизу асбестовым шнуром для защиты бумажной изоляции от обугливания и от вытекания припоя во время пайки. Пайку выполняют припоем ЦО-12 без применения флюса. Наконечник прогревают пламенем горелки и в него вводят палочку припоя; расплавленный припой заполняет пустоты между проволоками и наконечником; под слоем расплавленного припоя скребком снимают пленку окиси, которая переходит в шлак.

Способ разделки кабеля с бумажной изоляцией для монтажа свинцовых муфт приведен на рис. 6.9.

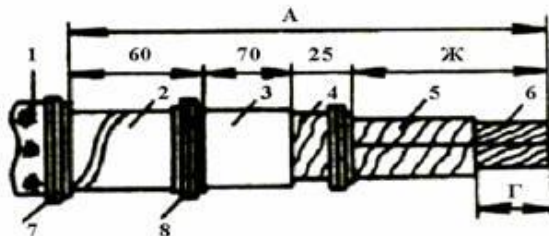


Рис. 6.9. Разделка кабеля с бумажной изоляцией для монтажа свинцовых муфт:

1 – наружный покров; 2 – броня; 3 – оболочка; 4 – поясная изоляция; 5 – изоляция жил; 6 – жила кабеля; 7, 8 – проволочные бандажи

Разделка кабеля для монтажа чугунных соединительных муфт показана на рис. 6.10.

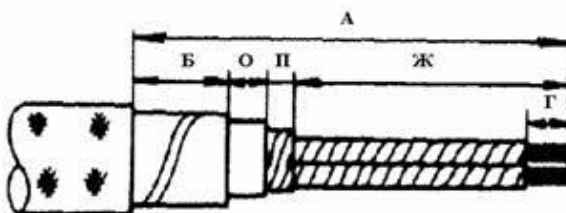


Рис. 6.10. Разделка кабеля для монтажа чугунных муфт

## 7. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНЦЕВЫХ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ МУФТ

### 7.1. Разделка концов кабелей с бумажной изоляцией

**Укладка концов кабеля.** Конец разделяемого кабеля распрямляют на длине 1-1,5 м. В холодное время года его необходимо прогревать «бегающим» огнем горелки для исключения излома изоляции и оболочки.

**Удаление джутового покрова.** Для монтажа концевых заделок и муфт внутри помещений джут снимают со всей длины кабеля. Для муфт, монтируемых в земле, джут снимают до первого бандажа, т. е. на размер А.

**Удаление брони.** Накладывают второй бандаж на расстоянии 60 мм от первого. Ленты брони надрезают у второго бандажа и удаляют со всей длины кабеля.

**Удаление покрова над оболочкой.** Ленты покрова удаляют, разматывая от концов кабеля. Битумный состав смывают ветошью, смоченной в бензине. Для снятия лент покрова допускается прогрев их «беглым» огнем горелки. Для снятия шланга выполняют кольцевой надрез на расстоянии А от конца кабеля, затем на нем выполняют продольный надрез.

**Снятие оболочки.** От среза брони на расстоянии 70 мм выполняют первый кольцевой надрез, а на расстоянии 30 мм от первого – второй надрез. От второго кольцевого надреза до конца кабеля по свинцовой оболочке выполняют два продольных надреза на расстоянии 10 мм друг от друга. Удаляют полосу до второго кольцевого надреза и снимают всю оболочку. Алюминиевую оболочку удаляют от второго кольца после выполнения надреза по винтовой линии под углом 45° к оси кабеля с помощью специального ножа.

**Удаление поясной изоляции.** Полупроводящую бумагу и ленты поясной изоляции обрывают на всем протяжении до края оболочки.

**Испытание изоляции на влажность.** Сухим пинцетом обрывают ленты бумажной изоляции, прилегающие к оболочке и к жилам, заполнители и погружают их в парафин, нагретый до 150 °С. Признаком влаги является потрескивание и появление пены. Так же проверяют на отсутствие влаги и проволоки жилы.

**Изгибание жил.** Жилы выгибают с помощью шаблона, соответствующего сечению кабеля (радиус изгиба жил равен 10...12 диаметрам жилы, или высотам сектора). Жилы выгибают вручную, постепенно передвигая пальцы рук по их длине.

**Соединение или оконцевание жил.** С концов жил снимают изоляцию в зависимости от способа соединения или оконцевания. Чтобы оставшаяся изоляция не разматывалась, ее перевязывают суровыми нитками. Производят соединение или оконцевание жил по принятому способу.

**Удаление оболочки между кольцевыми надрезами.** После изгиба жил и их соединения удаляют участок металлической оболочки между кольцевыми надрезами и накладывают бандаж из суровых ниток на край поясной изоляции. Торцы оболочки обрабатывают, удаляя заусенцы. Выполняют разбортовку металлической оболочки с помощью разборонок под соответствующее сечение кабеля.

**Удаление полупроводящей бумаги.** На полупроводящую бумагу в 5 мм от края металлической оболочки накладывают бандаж из суровых ниток. Удаляют полупроводящую бумагу до бандаж, оставляя бандаж на краю поясной изоляции.

**Наложение заземляющего проводника.** Провод заземления накладывают на металлическую оболочку и ленты брони, укрепляют его двумя-тремя витками бандаж из оцинкованной проволоки. Алюминиевую оболочку предварительно обслуживают припоем марки А, затем оловянно-свинцовым припоем. Пайку проводников заземления выполняют оловянно-свинцовым припоем. Проводник выбирают длиной, достаточной для присоединения к металлическим корпусам муфт и опорным конструкциям. Свободный конец провода заземления оконцовывают наконечником, присоединяемым способом сварки, опрессовки или пайкой.

**Удаление расцветочных лент на фазах.** Удаление производят непосредственно перед установкой муфт для защиты бумажной изоляции от загрязнения в процессе разделки кабеля.

## 7.2. Разделка кабелей с пластмассовой изоляцией

**Укладка концов кабелей для монтажа и удаления верхнего покрова.** Концы кабеля распрямляют на длине 1 м. На наружном пластмассовом шланге (при его наличии) на расстоянии *A* от конца выполняют кольцевой и продольный надрезы на половину толщины шланга и удаляют его. При наличии джута поверх брони накладывают первый бандаж на расстоянии *A* и удаляют верхний покров.

**Удаление брони и подушки под ней.** На броню накладывают второй бандаж на расстоянии 40 мм от первого или от среза верхнего шланга. Бронерезкой надрезают и удаляют до второго бандаж броню и подушку под ней. На ленты экрана кабеля 6...10 кВ в 30 мм от среза брони накладывают бандаж, после чего ленты обрезают. Полупроводящий экран должен выступать из-под среза металлического экрана на 10 мм.

**Удаление поясной изоляции.** В 10 мм от полупроводящего экрана на пластмассовой поясной изоляции делают кольцевой надрез и от него – продольный до конца кабеля на всей длине на глубину половины толщины изоляции, удаляют изоляцию.

**Изгибание жил.** Изгибание изолированных жил выполняют с радиусом не менее 10 диаметров жилы по изоляции или высоты сектора.

**Наложение заземляющего проводника.** К лентам металлического экрана проводник заземления припаивают с помощью паяльника, так как пламя горелки может повредить пластмассовую изоляцию.

## 7.3. Технология монтажа соединительной свинцовой муфты

**Надевание свинцовой трубы на кабель.** На один из концов кабелей подматывают чистую тряпку, после чего на него надевают свинцовую трубу. Трубу предварительно выпрямляют на деревянном шаблоне и протирают изнутри чистой ветошью.

**Разделка кабеля.** Для изолирования бумажными рулонами проводят ступенчатую разделку изоляции: на участке длиной 16 мм для кабелей на напряжение 6 кВ и 24 мм на 10 кВ; в кабелях 6 кВ образуются две ступени по 8 мм, а в кабелях 10 кВ – три. Для намотки роликами или лентой ЛЭТСАР ступенчатой разделки не выполняют.

**Соединение жил.** Жилы соединяют опрессовкой или пайкой. Заусенцы на гильзах удаляют с помощью напильника и наждачной бумаги.

**Прошпарка бумажной изоляции.** Выполняют прошпарку бумажной изоляции массой, разогретой до температуры 120...130 °С, для удаления пыли, влаги, металлических опилок и пополнения пропиточного состава в изоляции кабеля.

**Изолирование жил рулонами.** Между ступенчатой разделкой и гильзой подматывают роликами шириной 5 мм до уровня заводской изоляции или диаметра гильзы в зависимости от того, что имеет меньший размер. Роликами шириной 10 мм выравнивают бумагу до диаметра гильзы, а затем подматывают 6–7 слоев по гильзе и на бумажной изоляции фаз не менее чем по 100 мм, создавая ровный слой под намотку рулонами. Выполняют вторую прошпарку. В рулонах перед намоткой с помощью шаблона выдвигают внутренние слои бумаги на 30 и 40 мм (для кабелей 6 и 10 кВ соответственно), обрезают образовавшийся конус, а затем сдвигают слои рулона в обратную сторону на 15 и 20 мм внутрь. Производят намотку рулонами каждой фазы, плотно навивая бумагу. Во время намотки каждым оборотом рулона подтягивают намотанный слой. Затянув рулон до отказа, обрывают верхние загрязненные руками слои бумаги. Толщина намотки должна быть 5 мм для кабелей 6 кВ и 7 мм – для 10 кВ. Выполняют третью прошпарку после намотки рулонов. Все три изолированные жилы сближают вплотную, на них накладывают роликом бандаж шириной 50 мм или два бандажа по 25 мм на толщину 2 мм. Бандаж укрепляют хлопчатобумажной пряжей.

**Изолирование жил лентами ЛЭТСАР.** Изоляцию жил и гильзы обезжиривают ацетоном или авиационным бензином. На гильзу и участок жилы между изоляцией и гильзой кисточкой наносят слой лака КО-916. Накладывают один слой ленты ЛЭТСАР ЛПм с 50 %-ным перекрытием, являющейся адгезионной подмоткой. Поверх адгезионной подмотки накладывают липкую самосклеивающуюся ленту ЛЭТСАР с 50 %-ным перекрытием и с заходом на бумажную изоляцию жил на ширину 30...40 мм. Толщина намотки – 5 мм для кабелей 6 кВ и 7 мм – для 10 кВ. Ленты накладывают с натягом, так чтобы ширина ленты составляла 70 % первоначальной. Поверх трех изолированных жил накладывают общий бандаж из двух-трех слоев стеклоленты для защиты от механического повреждения верхнего слоя ленты ЛЭТСАР при вращении свинцовой трубы при обколачивании (рис. 7.1).

**Изолирование жил роликами.** Для изолирования роликами шириной 25 мм выполняют выравнивающую подмотку роликами 10 мм на неизолированной жиле между срезом заводской изоляции и гильзой. Сначала роликом шириной 50 мм накладывают на гильзу 8...10 слоев, затем роликом 25 мм – также 8...10 слоев. После этого накладывают подмотку роликами 25 мм, выполняя «сигару» по всей прямолинейной части соединения жил. Толщина подмотки поверх гильзы должна быть 5 мм для кабелей 6 кВ и 7 мм – для кабелей 10 кВ. Жилы сближают вместе и на них накладывают общий бандаж роликом 50 мм на толщину 2 мм. Выполняют прошпарку массой МП-1.

**Удаление оболочек над пояском.** Удаляют оболочки между двумя кольцевыми надрезами. Свинцовую оболочку кабеля разбортовывают, а у алюминиевой удаляют острые края среза оболочки. Полупроводящая бумага должна выступать из-под края оболочки на 5 мм.

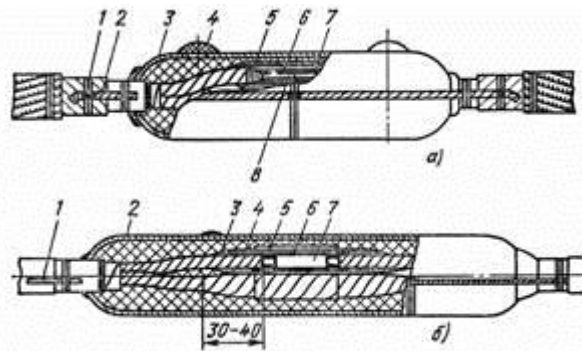


Рис. 7.1. Соединительные свинцовые муфты:

- а – свинцовая СС: 1 – бандаж; 2 – провод заземления; 3 – корпус муфты; 4 – заливочное отверстие; 5 – обмотка рулонами; 6 – подмотка роликами шириной 10 мм; 7 – то же шириной 6 мм; 8 – соединительная гильза;  
 б – свинцовая ССсл: 1 – провод заземления; 2 – свинцовый корпус муфты; 3 – заливочный состав; 4 – подмотка из ленты ЛЭТСАР КФ-0,5; 5 – бандаж из стеклоленты; 6 – адгезионная подмотка из ленты ЛЭТСАР ЛПм; 7 – гильза

**Облуживание оболочки.** Аллюминиевую оболочку перед пайкой свинцовой трубы облуживают припоем марки «А», затем оловянно-свинцовым припоем.

**Установка свинцовой трубы.** Свинцовую трубу сдвигают на место соединения, ее края обколачивают вальком для придания сферической формы до соприкосновения с оболочкой, непрерывно вращая трубу в сторону намотки роликами и рулонами. Края свинцовой трубы с присадкой меди для облегчения обколачивания подогревают пламенем горелки.

**Пайка шейки муфты.** Место пайки и пруток оловянно-свинцового припоя нагревают пламенем горелки, получая слой припоя над оболочкой и постепенно сдвигая его тряпочкой по всей окружности, прогревая те участки, на которые сдвигается припой. С помощью зеркала проверяют качество пайки в нижней части шейки. Продолжительность пайки одной шейки – 3-4 мин (во избежание перегрева поясной изоляции).

**Вырубка заливочных отверстий.** Вырубают два отверстия по двум сторонам равностороннего треугольника, образовавшийся язычок отгибают вверх.

**Пайка второй шейки.** Пайку второй шейки выполняют после вырубки заливочных отверстий, так как при их отсутствии может образоваться свищ от избыточного давления при сгорании продуктов шпарки внутри муфты.

**Заливка муфты.** Муфту заливают мастикой через одно из заливочных отверстий тонкой струей до тех пор, пока в массе, вытекающей из второго отверстия, не прекратится выделение пены и пузырьков. В холодное время перед заливкой свинцовую муфту прогревают до температуры 50 °С. Для равномерного заполнения массой муфту располагают строго горизонтально. Доливку муфты производят 2 раза по мере остывания массы и ее усадки.

**Запаивание заливочных отверстий.** Заливочные отверстия закрывают язычками и припаивают. Необходимо следить, чтобы припой при пайке не попал через отверстие внутрь муфты.

**Заземление муфты.** Провод заземления укладывают вдоль муфты, оболочек кабеля и брони. Укрепляют бандажом из оцинкованной проволоки на середине муфты, оболочках кабеля и брони, припаивают только на муфте и броне во избежание расплавления шейки муфты при пайке. Для небронированных кабелей типа ААШв разделку оболочки выполняют не на 70, а на 90 мм; в этом случае пайку следует выполнить на оболочке, но вдали от шейки. Провод заземления выбирают такой длины, чтобы можно было присоединить его к болтам заземления защитных кожухов.

**Защита оболочек от коррозии.** Свинцовую оболочку оголенных участков кабелей и свинцовую муфту перед установкой кожуха покрывают битумным составом. Аллюминиевую оболочку и свинцовую муфту для защиты от почвенной коррозии дополнительно покрывают поливинилхлоридной лентой в два слоя с 50 %-ным перекрытием, поверх накладывают смоляную ленту и вновь покрывают битумом.

**Установка кожуха.** Для защиты от механических повреждений муфт, смонтированных в земле, применяют чугунные или стеклопластиковые кожухи. Под горловину кожуха на кабель подматывают

смоляную ленту. Диаметр подмотки должен быть на 5 мм больше внутреннего диаметра горловины кожуха. Для муфт, смонтированных в помещениях, применяют стальные разъемные или неразъемные противопожарные кожухи. Внутренний диаметр стального кожуха должен быть не менее 150 мм, длина – 1250 мм, толщина стенки – 5 мм; изнутри стальной кожух обкладывают асбестовым листом толщиной 8...10 мм: торцы кожуха закрывают асбоцементными крышками толщиной 20 мм, одну из которых крепят винтами к кожуху, а другую устанавливают без крепления.

**Оформление окончания работы.** После окончания монтажа на кабель в 500 мм от муфты устанавливают свинцовую бирку с указанием даты монтажа и фамилии исполнителя. Бирку крепят к кабелю несколькими слоями смоляной ленты. Трассировщик (или другое лицо) зарисовывает муфту в эскизную книжку с привязкой ее к постоянным ориентирам, а затем переносит на план.

#### 7.4. Технология монтажа заделок КВсл

**Разделка кабеля.** Конец кабеля длиной 1,5 м распрямляют и разделяют, длина жил в разделке должна быть не менее 150 мм для 1 кВ, 250 мм – для 6 кВ, 400 мм – для 10 кВ; ширина оболочки – 50 мм, поясной изоляции – 25 мм (рис. 7.2).

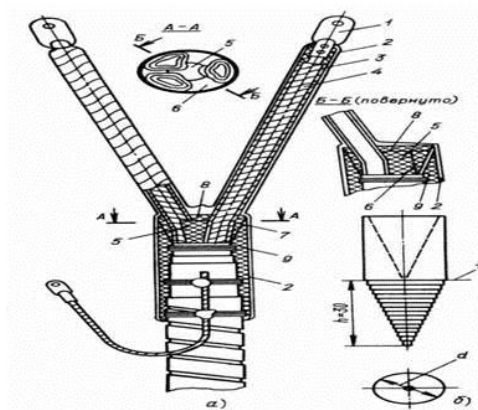


Рис. 7.2. Монтаж концевых заделок внутренней установки из самосклеивающихся лент типа КВсл

**Заземление разделки.** Провод заземления припаивают к оболочке и броне кабеля, а другой конец оконцовывают наконечником для присоединения его к опорной конструкции.

**Оконцевание жил.** Жилы оконцовывают наконечниками.

**Подмотка жил.** Поверхности оболочек, поясной изоляции, изоляции жил и наконечников обезжиривают. На оболочку и наконечник наносят тонкий слой лака КО-916. Накладывают двухслойную подмотку лентой ЛЭТСАР на жилы от поясной изоляции до контактной части наконечника. Ленту накладывают с 50 %-ным перекрытием и вытягивают до 70 % первоначальной ширины. Между изоляцией и наконечником выполняют выравнивающую подмотку.

**Наложение уплотнительных конусов.** В корешке разделки устанавливают уплотнительные центральный и боковые конусы из ленты ЛЭТСАР для заполнения промежутков между жилами. Конусы выматывают без натяжки до необходимого диаметра, затем выдавливают на 30 мм и обрезают. На концы накладывают слой лака КО-916 и вставляют в корешок.

**Наложение бандажирующей подмотки.** Жилы с помещенными между ними конусами сжимают в пучок и накладывают бандаж лентой ЛЭТСАР в 30 мм от поясной изоляции. Бандажирующая подмотка необходима для заполнения щелей в корешке заделки. Лентой ЛЭТСАР выполняют виток вокруг одной жилы, после чего переходят на другую, затем на следующую и так подматывают до устранения щелей в корешке.

**Наложение подмотки на корешок.** Трехслойную подмотку лентой ЛЭТСАР с 50 %-ным перекрытием накладывают на 30 мм участка жил, сжатых в пучок, на ступени поясной изоляции, оболочки и с заходом на 20 мм на наружные покровы кабеля. В процессе намотки ленту вытягивают так, чтобы ширина ее составляла 70 % исходной.

Подмотка из лент ПВХ. Однослойную подмотку из липкой поливинилхлоридной ленты с 50 %-ным перекрытием накладывают поверх ленты ЛЭТСАР на жилах в корешке и по ступени оболочки.

Заделки типа КВсл предназначены для оконцевания кабелей с бумажной изоляцией на напряжение до 10 кВ внутри сухих помещений при разностях уровней между высшей и низшей точками кабеля на трассе до 10 м. Концевые заделки типа КВС применяют для кабелей с бумажной изоляцией до 10 кВ внутри помещений и в наружных установках при условии защиты заделки от попадания атмосферных осадков.

#### 7.5. Изготовление концевых муфт из термоусаживаемых материалов

##### *Монтаж концевых термоусаживаемых муфт марки КВТп на напряжение до 10 кВ*

Концевые термоусаживаемые муфты КВТп предназначены для оконцевания силовых кабелей с алюминиевыми или медными жилами, в алюминиевой, свинцовой или пластмассовой оболочке, в защитных покровах или без них, с бумажной или пластмассовой изоляцией напряжением до 10 кВ частотой 50 Гц, находящихся внутри помещений. Муфты устанавливают в любом положении и применяют на трассах с разностью уровней концов кабелей до 25 м [13].

Кабели с бумажной изоляцией муфты предназначены для эксплуатации внутри помещений категории УЗ, а кабели с пластмассовой изоляцией – внутри помещений всех категорий.

Выбор типоразмеров муфт производят в зависимости от сечения, вида изоляции и числа жил, рабочего напряжения кабеля. Пример обозначения муфты концевой внутренней установки, термоусаживаемой, полиэтиленовой второго типоразмера на напряжение до 10 кВ при ее заказе и в документации другой продукции: муфта КВТп-2-10. Перед началом монтажа муфты проверяют комплектность упакованных деталей и материалов.

Монтаж муфты начинают с разметки кабеля, т. е. определяют местонахождение муфты и длину жил до подключающего устройства. После этого лишнюю длину кабеля отрезают и приступают к ступенчатой разделке конца кабеля.

Ступенчатая разделка заключается в последовательном удалении на определенной длине защитных покровов, оболочки и изоляции кабеля.

На рис. 7.3,а показана разделка конца кабеля с бумажной изоляцией напряжением до 10 кВ.

Кабели с пластмассовой изоляцией напряжением 6 и 10 кВ имеют следующие конструктивные особенности:

- у кабелей напряжением 6 кВ изолированные жилы заключены в общий шланг, поверх которого имеются полупроводящий и металлический (медный или алюминиевый) экраны;

- у кабелей напряжением 10 кВ поверх каждой жилы имеется полупроводящий и металлический экраны. Поясная изоляция отсутствует.



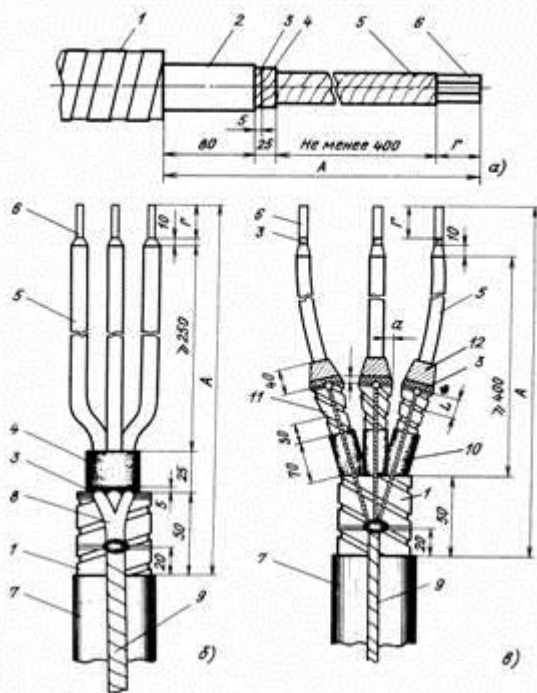


Рис. 7.3. Разделка кабелей для монтажа муфт из термоусаживаемых материалов: а – с бумажной изоляцией; б – с пластмассовой изоляцией напряжением 6 кВ; в – с пластмассовой изоляцией напряжением 10 кВ; 1 – броня; 2 – оболочка; 3 – полупроводящий слой; 4 – поясная изоляция; 5 – фазная изоляция; 6 – жила

Разделку кабеля с пластмассовой изоляцией на напряжение 6 кВ начинают с удаления отмеренной длины  $A$  наружного пластмассового шланга (рис. 7.3, б). При этом на поверхности шланга выполняют кольцевой и продольный надрезы на половину его толщины, после чего шланг на надрезанном участке удаляют. На расстоянии 50 мм от среза шланга поверх брони накладывают бандаж из стальной оцинкованной проволоки.

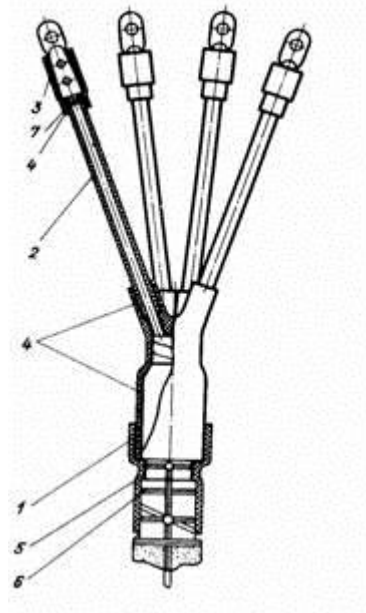
Со стороны торца кабеля бронерезкой или ножовкой с ограничителем глубины резания подрезают верхнюю и нижнюю ленты брони, после чего броню и подушку под ней удаляют.

Ленты полупроводящего и металлического экранов сматывают с конца кабеля. Ленты металлического экрана отгибают вниз и закрепляют бандажом на броне кабеля на расстоянии 20 мм от среза шланга, а затем обрезают по кромке бандажа. Ленты полупроводящего экрана обрезают у среза брони таким образом, чтобы ширина ступени полупроводящего экрана составляла 5 мм. После этого удаляют поясную изоляцию кабеля на расстоянии 25 мм от среза брони.

Заземление брони и ранее отогнутых металлических лент экрана выполняют следующим образом:

- ленты экрана и провод заземления облуживают припоем ПОС-40;
- ленты брони кабеля в месте пайки зачищают до металлического блеска напильником или ножовочным полотном;
- припаивают облуженные ленты экрана и провод заземления к зачищенной броне кабеля при помощи молоткового паяльника или насадки к горелке ГПВМ-01.

Разделку кабеля на напряжение 10 кВ начинают с удаления отмеренной длины  $A$  наружного пластмассового шланга (рис. 7.3, в), так же как у кабеля на напряжение 6 кВ. На расстоянии 50 мм от среза шланга поверх брони накладывают бандаж из стальной оцинкованной проволоки, надрезают по кромкам бандажа ленты брони и удаляют их вместе с подушкой под броней.



На оболочке каждой жилы на расстоянии 70 мм от бандаж выполняют продольный и кольцевой надрезы на половину ее толщины, а затем удаляют оболочку на надрезанном участке.

Ленты полупроводящего и металлического экранов сматывают с конца каждой жилы до места среза шланга и оставляют их до последующего монтажа. Салфеткой, смоченной в бензине или ацетоне, тщательно по всей длине жил смывают графитовый слой.

Конусную подмотку выполняют из липкой поливинилхлоридной либо липкой полиэтиленовой ленты (в зависимости от материала изоляции жил) или самосклеивающейся по пластмассовой изоляции жил начиная от точки, отстоящей на 30 мм от среза оболочки жилы. Размеры конусной подмотки приведены в таблице.

Размеры конусной подмотки (рис. 7.3, в)

Сечение жил кабеля, мм <sup>2</sup>	a	<i>L</i>
16	6	40
25...70	4	50
95...150	3.5	55
185...240	3	60

Ленты полупроводящего экрана, ранее смотанные с жил, наматывают с 30...50 %-ным перекрытием на конусную подмотку, на вершине которой эти ленты закрепляют бандажом из хлопчатобумажной пряжи или суровых ниток. Излишек полупроводящих лент обрывают по кромке бандаж.

Ленты металлического экрана наматывают на конусную подмотку и закрепляют проволоочным бандажом, не доходя на 5 мм до бандаж из суровых ниток. Из-лишки металлических лент обрезают ровно по кромке бандаж. После этого провод заземления расплетают на три одинаковых части и каждую часть припаивают паяльником к лентам металлического экрана каждой жилы. Провод заземления припаивают к броне-лентам кабеля припоем ПОС-40.

Разделанный конец провода с бумажной или пластмассовой изо-ляцией тщательно протирают салфеткой, смоченной в бензине.

На кабель надевают защитную манжету и сдвигают ее вниз, чтобы она не мешала дальнейшим операциям (рис. 7.4).

Рис. 7.4. Общий вид муфты КВТп:

1 – перчатка; 2 – трубка; 3 – бандажирующая манжета; 4 – герметизирующий слой; 5 – защитная манжета; 6 – проволоочный бандаж; 7 – нитяной бандаж

Жилы кабеля разводят. На каждую жилу надевают до упора в поясную изоляцию термоусаживаемые трубки, которые прогревают и усаживают начиная с корешка разделки. Часть трубки, выступающей за жилу кабеля, обрезают.

Для усадки манжет, трубок и перчаток применяют оснастку.

На жилах кабеля, имеющих поливинилхлоридную изоляцию, трубки не устанавливают. Оболочку кабеля прогревают до температуры 50...60 °С (на выдержку руки). Затем на корешок разделки надевают и усаживают термоусаживаемую перчатку таким образом, чтобы корпус и пальцы перчатки полностью

обтянули оболочку и изолированные трубками жилы кабеля. При усадке следят за расплавлением герметизирующего клеящего слоя. Усаженная перчатка не должна иметь морщин и складок.

По окончании усадки перчатки нагревают броню кабеля до 50...60 °С (на выдержку руки), надевают на корпус перчатки и место пайки провода заземления защитную манжету и усаживают ее таким образом, чтобы она полностью перекрыла оголенный участок оболочки и места пайки провода заземления на оболочке и броне. При усадке также следят за расплавлением герметизирующего клеящего слоя.

Термоусаженная манжета не должна иметь морщин и складок.

По окончании работ по усадке трубок, перчаток и манжет приступают к выполнению окончевания жил кабеля. Для этого удаляют фазную изоляцию жил вместе с усаженной трубкой (под наконечник) на участке Г и напрессовывают или напаявают кабельные наконечники. Поверхность цилиндрической части наконечников очищают от заусенцев, острых краев, наплывов при помощи напильника и наждачной бумаги, предохраняя ранее усаженные трубки от попадания металлических опилок. Заполняют зазор между срезом изоляции и наконечником (если он имеется) лентой ПВХ до толщины фазной изоляции.

Нагревают цилиндрическую часть наконечников до температуры 50...60 °С, надевают и усаживают бандажирующие манжеты таким образом, чтобы они плотно обжимали жилы кабеля и цилиндрическую часть наконечников. При усадке следят за расплавлением герметизирующего клеящего слоя.

При поставке трубок, перчаток, манжет без клеящего слоя металлические части кабеля (броня, оболочка, цилиндрическая часть наконечника) нагревают до температуры 50...60 °С и обмазывают клеем ГИПК 14-17. Затем в технологической последовательности, описанной выше, устанавливают манжеты, трубки, перчатки и усаживают.

Остывшую до температуры 30...35 °С муфту можно вводить в эксплуатацию после проведения приемочных испытаний (целость жил, фазировка линии, испытания повышенным напряжением).

## Литература

1. Радкевич В.Н., Ничипорович Л.В. Исследование методов оптимизации процессов поиска повреждения в городских сетях 6 – 10 кВ // Изв. вузов СССР. – Энергетика. – 1977. – № 1. – С. 107 – 109.
2. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1982.
3. Определение мест повреждений в воздушных и кабельных линиях // Энергетика за рубежом. – М.: Госэнергоиздат, 1959.
4. Макеев Л.Н. Резонансная прожигательная установка и генератор звуковой частоты для отыскания мест повреждения кабельных линий электропередачи // Определение мест повреждения воздушных и кабельных линий электропередачи. – М.: Энергия, 1966. – С. 124 – 128.
5. Платонов В.В., Шалыт Г.М. Испытание и прожигание изоляции силовых кабельных линий. – М.: Энергия, 1975.
6. Мирзабекян З.Т. Конструктивные данные компенсирующей индуктивной катушки для прожигания изоляции кабельных линий резонансным методом // Энергетик. – 1967. – № 4. – С. 29 – 30.
7. Сидельников В.В. Распространение электромагнитных волн высокой частоты по силовым трёхфазным кабелям с поясной изоляцией // Автоматика, телемеханика и приборостроение. – М. – Л.: Наука, 1964.
8. Половников В.А. Исследование и усовершенствование системы определения мест повреждения силовых кабельных линий импульсным методом. – М.: ВНИИЭ, 1980.
9. А.с. № 476524 (СССР). Способ определения места замыкания жилы на металлическую оболочку многожильного силового кабеля / Щедрин Б.М. Оpubл. в Б.И., № 25, 1975.
10. Бахмутский В.Ф., Зуенко Г.И. Индукционные кабелеискатели. – М.: Связь, 1970.
11. Толкачев Г.Л., Расторгуев В.Ф. Монтаж полимерной кабельной арматуры. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
12. Пантелеев Е.Г. Монтаж и ремонт кабельных линий: Справочник электромонтажника. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
13. Техническая документация на муфты для силовых кабелей с бумажной и пластмассовой изоляцией до 35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
14. Справочник по ремонту и техническому обслуживанию электрических сетей // Под ред. Антипова К.М., Бандуилова И.Е. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
15. Дементьев В.С. Как определить место повреждения в силовом кабеле. – М.: Энергия, 1980.
16. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Атомиздат, 1993.
17. Правила устройств электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986.