

## 4.3 Маслонаполненные кабели

### 4.3.0 Общая информация

Конструкция кабелей

Гидравлика маслонаполненных кабелей

4.3.1	60 кВ	одножильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POCUW-T
4.3.2	132 кВ	одножильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POCUW-T
4.3.3	150 кВ	одножильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POCUW-T
4.3.4	220 кВ	одножильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POCUW-T
4.3.5	380 кВ	одножильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POCUW-T
4.3.10	60 кВ	одножильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POPВ-T
4.3.11	132 кВ	одножильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POPВ-T
4.3.12	150 кВ	одножильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POPВ-T
4.3.13	220 кВ	одножильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POPВ-T
4.3.14	380 кВ	одножильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POPВ-T
4.3.20	60 кВ	трехжильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POCUW-T
4.3.21	60 кВ	трехжильный	бумага/масло	радиально водонепроницаемый	POPВ-T

## Высоковольтные кабели

### Общая информация

В маслонаполненных кабелях диэлектрический слой формируется из бумажных лент, намотанных поверх жилы и затем пропитанных специальным маслом. Когда кабель находится в эксплуатации, во всей линии передачи поддерживается требуемое давление масла. По отдельности ни бумага, ни масло не являются высокоэффективными диэлектриками, однако совместно они обеспечивают надежную изоляцию.

220 кВ маслонаполненные кабели, используемые в Швейцарии, имеют напряженность электрического поля от 10 до 12 кВ/мм, а 380 кВ кабели – 16-18 кВ при номинальном напряжении и выдерживают 100 кВ/мм при импульсной нагрузке. Чтобы соответствовать этим высоким показателям, нужно обеспечить следующие предосторожности:

- использовать специальную тонкую изоляционную бумагу вблизи токопроводящей жилы;
- обеспечивать тщательный индивидуальный контроль натяжения. Технологическое оборудование, может за один проход накладывать до 320 лент.

Основным преимуществом маслонаполненных кабелей является возможность постоянного мониторинга состояния изоляции, и в случае обнаружения серьезной неисправности подача электроэнергии может быть прекращена прежде, чем наступит повреждение линии. Применяемые в настоящее время гофрированные металлические оболочки делают риск утечки масла весьма незначительным.

### 1. Конструкция кабеля

В настоящее время в основном используются два типа маслонаполненных кабелей – одножильный и трехжильный. Так как они значительно отличаются, целесообразно рассмотреть обе конструкции отдельно.

#### 1.1. Трехжильные кабели

В трехжильном кабеле три жилы изолируются отдельно. Каждая жила имеет круглую форму, составлена из круглых медных или алюминиевых проволок, круглого сечения, слегка уплотнена.

Каждая жила несколько раз оборачивается бумагой с графитом в качестве внутреннего полупроводящего слоя, предназначенного для выравнивания поверхности жилы. Толщина изоляции зависит от номинального напряжения кабеля. Слой, покрывающий изоляцию, включает одну бумажную ленту “Hoch staedter” и одну полупроводящую бумажную ленту, которые намотаны послойно. Так электрически изолируются отдельные фазы. Когда все слои наложены, три отдельные жилы скручиваются, при этом в промежутки между ними закладываются стальные спирали или перфорированные пластиковые трубки, которые образуют масляные каналы. Скрученные фазы и маслопроводящие каналы скрепляется хлопковой лентой с вплетенными медными нитями. Медные нити обеспечивают электрический контакт между бумагой “Hoch staedter” и защитной металлической оболочкой. Оболочка может быть выполнена из свинца, алюминия, меди или нержавеющей стали. Снаружи защитной оболочки трехжильного кабеля часто предусматривается дополнительная броня из оцинкованных плоских проводов. Эти кабели с

жилами сечением от 95 до 400 мм<sup>2</sup> обычно используются на 60 кВ линиях. При больших напряжениях непомерно большим окажется диаметр кабеля, и это не практикуется.

Самый большой кабель, когда-либо произведенный компанией “Brugg”, – 150 кВ кабель сечением 3x150 мм<sup>2</sup>, который соединил электростанцию с наружной подстанцией. Диаметр этого кабеля – 103 мм, общая длина 200 м, а погонный вес – 27,8 кг/м.

#### 1.2. Одножильные маслонаполненные кабели.

Жила большинства одножильных маслонаполненных кабелей состоит из круглых медных или алюминиевых проводов, скрученных вокруг опорной стальной спирали, которая формирует масляный канал. В некоторых конструкциях используются провода трапецеидального профиля, и стальная спираль оказывается не нужной. При сечениях 1000 мм<sup>2</sup> и выше жила состоит из сегментов, изолированных друг от друга электропроводящими бумажными лентами и образующих в центре кабеля масляный канал (рис. 1). Такая конфигурация позволяет существенно снизить потери, связанные со скин-эффектом (эффект близости). Чтобы обеспечить круглую форму сегментной жилы

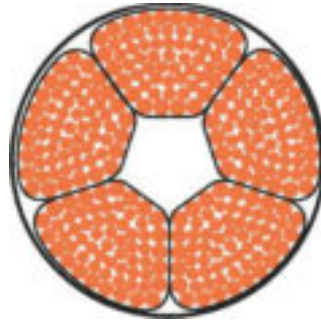
и предотвратить чрезмерное натяжение бумажных лент при изгибе кабеля, пять сегментов плотно обматываются немагнитной стальной лентой.

Круговые или сегментные проводники с внутренней полостью обмотаны несколькими слоями электропроводящей графитной бумаги.

Особое внимание уделяется конструкции изолирующего слоя, а именно типу бумаги, ее толщине и методам обмотки. 380 кВ маслonaполненные кабели имеют слой изоляции толщиной от 23 до 26 мм, образованный из 280 - 360 отдельных лент, толщина которых колеблется от 0,04 до 0,15 мм.

Бумага, разработанная для изоляции маслonaполненных кабелей, имеет структуру длинно волоконного типа и обладает высокой прочностью и хорошей масляной проницаемостью для обеспечения радиального проникновения масла сквозь изоляцию. Изоляция жилы обмотана экраном "Hochstaedter", который состоит из одной полупроводящей бумаги и одной перфорированной алюминиевой ленты.

Металлическая поверхность этого слоя обеспечивает равномерное распределения поля по изоляции, а также обеспечивает электрическое экранирование отдельных фаз. Хлопковая лента с вплетенными медными нитями обеспечивает электрическое соединение между слоем бумаги "Hochstaedter" и металлической оболочкой.



**Рис. 1. 5-ти сегментный проводник с центральным масляным каналом**

Свинцовые оболочки, выполненные из специально разработанного сплава, дают идеальную комбинацию качеств, необходимых для высоковольтных кабелей:

- герметичность;
- электропроводность;
- гибкость;
- сопротивление старению и коррозии;
- простота монтажа арматуры.

Политика компании "Brugg", предусматривающая систематическое (металлургическое) испытание оболочек кабелей, несущих давление, завоевала международное признание, и известно, что оболочки и зоны сплавления имеют наилучшую микроструктуру (рис. 2). В процессе непрерывной экструзии свинцовый сплав и чистый алюминий преобразуются в бесшовную оболочку кабеля.

Если требуется изготовить оболочки с более тонкими и более гибкими стенками, чем те, что изготавливаются методом непрерывной экструзии, то они могут быть выполнены из предварительно изготовленных полукруглых секций, которые затем свариваются продольно в среде защитных газов (рис. 3 и 4). Алюминиевые, медные и стальные оболочки сделаны со спиральными гофрами, что позволяет им выдерживать давление масла без дополнительного усиления конструкции, свинцовые оболочки обматывают лентами из немагнитной стали, их толщина зависит от давления масла. Две ленты наматываются таким образом, чтобы внешняя лента покрывала промежуток внутренней спирали.

При давлениях свыше 8 бар дополнительный слой из полос немагнитной стали накладывается в продольном направлении под намотанные ленты, чтобы ограничить продольное растяжение кабеля. Сверхпрочная полиэтиленовая оболочка экструдирована поверх усиливающих лент в качестве коррозионной защиты.

В случае гофрированных оболочек эта внешняя рубашка состоит из двух слоев – один для заполнения гофр, другой – как внешняя защита.

Оболочки высоковольтных кабелей могут быть маркированы двумя диаметрально противоположными красными полосами.

Броня для одножильных маслонаполненных кабелей, устанавливаемых например в глубоких шахтах, изготавливается из проволок из немагнитного сплава "Aldrey", наложенных поверх внешнего защитного слоя. В зависимости от конкретной ситуации (влажные галереи, подстанции, ненамеренный перенос электрического потенциала) поверх брони иногда экструдируется дополнительный термопластичный слой.

## 2. Гидравлика маслонаполненных кабелей

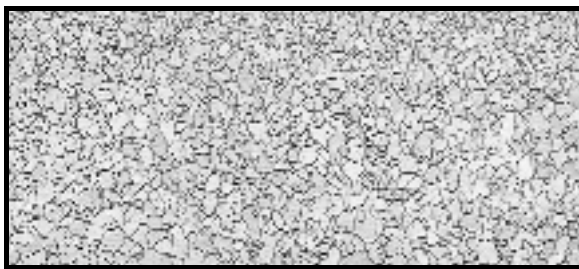
### 2.1 Давление и потоки масла

Постоянные изменения токов нагрузки, флуктуации температуры земли и воздуха вызывают постоянное изменение объема масла, содержащегося в кабеле и вспомогательном оборудовании. Поэтому устанавливаются компенсационные резервуары, которые реагируют на изменения объема и поддерживают неизменное давление масла.

Масло движется внутри одного центрального канала в одножильных кабелях и в трех каналах, расположенных в промежутках между проводниками, в трехжильных кабелях, при необходимости оно поступает в компенсационные резервуары или покидает их.

Следует различать статическое давление, вызванное перепадом высот концов кабеля, и динамическое давление, обусловленное короткими замыканиями или резким возрастанием токов нагрузки в кабеле с низкой температурой. В кабелях с компенсационным резервуаром, расположенном только на одном его конце, давление увеличивается как квадрат расстояния от резервуара, поэтому максимальное давление оказывается на противоположном от резервуара конце кабеля. Давление в кабелях с резервуарами, расположенными на обоих его концах, описывается симметричной кривой, как показано на рис. 5. В кабеле горизонтального расположения и нормальной нагрузке при правильном подборе размеров масляных каналов и емкости резервуаров возможно обеспечение объемной компенсации масла на длине кабеля до 5000 м. При длине кабеля свыше 5000 м или при перепаде высот 150 м и более необходима установка стопорных *мычм (stop joint)*. Они делят кабель на гидравлически независимые участки, в которых статическое давление масла и его потоки поддерживаются в допустимых пределах. Рабочее давление в маслонаполненных кабелях низкого давления обычно лежит между 1 и 8 бар, но в специальных случаях может составлять до 20 бар.

**Рис. 2:**  
Микро снимок сплава свинцовой оболочки



**Рис 3:**  
Микро снимок сварного шва гофрированной медной оболочки



**Рис 4:**  
Микро снимок сварного шва оболочки из гофрированной нержавеющей стали

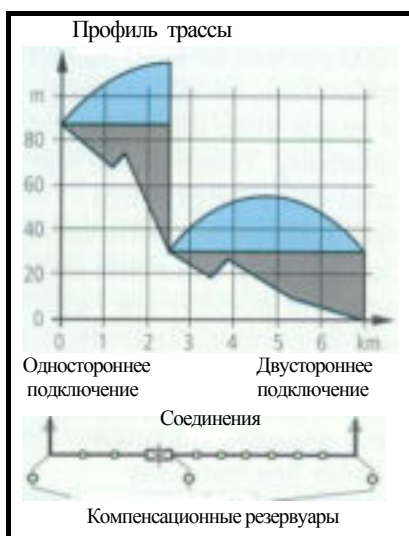


## 2.2 Масляные компенсационные резервуары и мониторинг давления масла

Компенсационные резервуары представляют собой стальные емкости с набором герметичных сжимаемых ячеек, которые в зависимости от конфигурации системы заполнены воздухом с начальным давлением 0,3 – 2,5 бар. Свободное пространство резервуара откачивается и заполняется дегазированным изолирующим маслом. На рис. 6 показаны типовые зависимости давления и объема компенсационных резервуаров.

Крайне важен надежный мониторинг гидравлического давления в кабеле. Система предусматривает манометры или переключатели давления, соединенные с центральной станцией мониторинга.

**Рис. 5:**  
Расположение кабеля и  
диаграммы давления масла



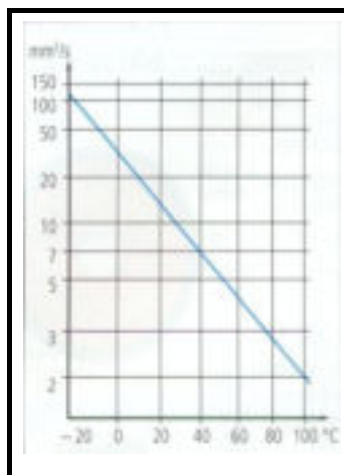
**Рис. 6.**  
Кривые давление-объем для ряда значений начального давления в компенсационных резервуарах.



## 2.3 Определение размеров компенсационных резервуаров

При использовании кабельного масла его объем в системе изменяется на величину 0,07% на один градус Цельсия.

В средних широтах температура маслonaполненных кабелей при эксплуатации лежит между 0 и 70°C. В этом случае изменение объема может составить 5%. Каждая отдельная ячейка обеспечивает изменение объема на величину около 1,5 л. Чтобы приспособиться к конкретным условиям местности (расположение стопорных муфт и концевых муфт, например) возможно варьировать начальное давление в ячейках, таким образом меняя рабочий диапазон давления компенсационных резервуаров, чтобы обеспечить некоторое повышение давления в наивысших точках кабельной линии.



**Рис. 7.**  
Зависимость вязкость-температура для синтетического кабельного масла с низкой вязкостью

#### Техническая спецификация синтетического кабельного масла

Вязкость			
при 20 <sup>0</sup> C	max	10	мм <sup>2</sup> /с
при 50 <sup>0</sup> C		3,4	мм <sup>2</sup> /с
Температура застывания		-40	°C
Температура воспламенения		125	°C
Кислотное число	max	0,03	мг КОН/г
Плотность		0,87	г/см <sup>3</sup>
Коэффициент термического расширения		7,9x10 <sup>-4</sup>	°C
Диэлектрические потери (tan δ) при 90 <sup>0</sup> C	max	28 x 10 <sup>-4</sup>	

Этапы проектирования масляных компенсационных резервуаров:

1. Подсчитайте общий объем масла в системе, включая масло, содержащееся в концевых муфтах, стопорных муфтах и компенсационных резервуарах.
2. Подсчитайте величину изменения объема масла.
3. Определите положение масляных компенсационных резервуаров на местности, учитывая длину кабельной линии и рельеф местности.
4. Предварительно подсчитайте общее число ячеек компенсационных резервуаров в системе, разделив величину изменения объема масла на 1,5 л (изменение объема одной ячейки). Это дает возможность выбрать тип и число масляных компенсационных резервуаров и величину начального давления в ячейках.
5. Рассчитайте распределение давления по длине линии и назначьте максимальное и минимальное значения давлений для срабатывания сигнализации и отключения линии.
6. Подсчитайте имеющийся компенсационный объем, и сравните его с изменением объема, возможного при эксплуатации системы.
7. Определите начальное давление при заполнении ячеек.

При детальном проектировании резервуаров следует также учитывать пиковые значения давления, вызванные резким изменением температуры при переходных процессах нагружения и коротких замыканиях.