

# Высоковольтные кабели

## Историческая справка

### Техническое развитие

#### 1. Кабели с бумажной изоляцией, пропитанные со стекающим и нестекающим изоляционным составом.

В конце прошлого века с развитием электростанций и распределительных сетей потребовалось ответить на вопросы, касающиеся конструкции силовых кабелей линий электропередачи. Первые линии были воздушного типа, однако вскоре для обеспечения защиты от электрических ударов потребовались изолированные силовые кабели. Обеспечение безопасности силовых линий передачи особенно важно, так как жилы должны быть не только изолированы электрически, но и выдерживать внешние механические воздействия. Первые изолированные кабели представляли собой жилы, обмотанные сухими бумажными лентами. Их пропитывали высоко вязким составом, обеспечивающим высокую электрическую прочность диэлектрика. Основную сложность представляла проблема удаления воды из изоляционного слоя. Изобретение свинцового пресса Бертодом (Berthoud) и Борелом (Borel) из Кортаилода (Cortailod, 1878) разрешило проблему. С этого момента стало возможно защитить одножильные и многожильные кабели от вредного воздействия воды посредством толстой свинцовой оболочке, которая также в случае ее заземления защищала персонал от электрического удара. Конструкции современных кабелей унаследовали основные черты первых кабелей. Самое значительное усовершенствование – замена пропиточного масла более чистым нестекающим составом. Кабели данного типа, появившиеся на рубеже века, оставались в эксплуатации, демонстрируя чрезвычайную эффективность и надежность вплоть до 80-х годов. В большинстве случаев замена кабелей была связана не с отказами, связанными со старением кабелей, а с необходимостью передачи электроэнергии при более высоких напряжениях. В качестве одного из первых примеров новой конструкции кабелей можно упомянуть линию передачи с напряжением 50 кВ, установленную в 1928 году между Гуттаненом (Guttannen) и Гандегом (Handegg) швейцарской компанией “Oberhasli Power Company Network”.

#### 2. Маслонаполненные кабели

Резкий рост потребления электроэнергии с начала прошлого века неизбежно привел к увеличению напряжения в линиях передачи. Вскоре обнаружилось, что кабели с вязкой пропиткой не работоспособны при работе от 60 кВ и выше. Увеличение толщины изоляции позволило успешно работать при напряжениях до 100 кВ. Однако при больших напряжениях надежность и сопротивление старению оказались неудовлетворительными. В начале 20-х годов 20 столетия Л. Эмануэлли (L. Emanuelli) из миланской компании “Pirelli” (Италия), изобрел маслонаполненный кабель, и это изобретение по существу не подверглось изменениям до сих пор. В 1933 Бруг (Brugg) приобрел у “Pirelli” лицензию на производство кабелей и изготовил маслонаполненный одножильный кабель, рассчитанный на напряжение 150 кВ. Сначала его использовали параллельно с воздушной линией электропередачи на подстанции Тосс (Toss) швейцарской компании “North-East Switzerland Power Company”. Компания “Brugg” сделала ряд нововведений в технологии высоковольтных кабелей и оборудования, в частности испытание импульсным напряжением.

В 1942 году в Швейцарии сооружена первая полно масштабная линия протяженностью 600 м на основе маслонаполненных кабелей. Она соединила подземный завод “Innertkirchen no. 1” с наружной трансформаторной подстанцией компании “Oberhasli Power Company”. Сегодня эти маслонаполненные кабели по-прежнему находятся в работе и демонстрируют надежную безотказную работу. К числу пионерских работ компании “Brugg” в области маслонаполненных кабелей относятся:

- линия передачи “Рессиа-Равона” с маслонаполненными кабелями длиной 6500 м и напряжением 200 кВ для компании “Maggia Power Company”;
- 150 кВ линия с маслонаполненными кабелями между Гуттаненом и Гандегом сети “Oberhasli Network”, перепад высот составил 300 м на длине 5000 м;
- первый маслонаполненный кабель для рабочего напряжения 380 кВ, предназначенный для генераторной станции “North-East Switzerland Power Company’s Mapragg”;



- оборудование на основе маслонаполненных кабелей и рабочим напряжением 380 кВ для гидроэлектростанции "Karakaya Hydro Power Station" в Турции, где перепад высот составляет 130 м.

К концу 1995 года компания "Brugg" изготовила 750 км маслонаполненных кабелей для напряжений от 60 до 380 кВ. На сегодня ни один из этих кабелей не имел отказов, связанных с несовершенством изоляции.

### 2.1. Как работает маслонаполненный кабель

В маслонаполненных кабелях бумажная изоляция пропитывается маслом, которое постоянно держится под давлением. В процессе изготовления из каждого кабеля откачивается воздух, и полость заполняется маслом. Особенно важно обеспечить отсутствие воздушных пузырьков. Во время эксплуатации кабель нагревается и масло расширяется. Изменения объема масла регулируются компенсационными резервуарами, соединенными с концами кабеля. Давление в резервуарах поддерживается сжатым воздухом, находящемся в сжимаемых секциях. Масляные протоки внутри кабеля позволяют ему свободно перетекать при расширении или сжатии. Объем гидравлической системы выбирается в соответствии с длиной кабеля так, чтобы даже в случае короткого замыкания риск механического повреждения был минимален за счет выравнивания гидравлического давления, вызванного выбросами давления вследствие резкого нагрева. Маслонаполненные кабели чрезвычайно устойчивы к старению. Измерения коэффициента диэлектрических потерь кабеля, предназначенного для напряжения 150 кВ и находящегося в эксплуатации 30 лет, дали практически такой же результат, как и тогда, когда впервые ввели в эксплуатацию. Маслонаполненные кабели, отличающиеся тем преимуществом, что в них возможен постоянный мониторинг давления масла, сегодня остаются наиболее надежными в эксплуатационном отношении среди всех высоковольтных и сверх высоковольтных кабелей. Маслонаполненные кабели имеют толстую бесшовную герметичную оболочку из свинца, или медную или алюминиевую гофрированную оболочку, которая заключает в себе гидравлический контур.

### 3. Кабели с пластмассовой изоляцией

В отличие от масло- и газонаполненных кабелей изоляция проводников полимерная изоляция кабелей представляет собой твердый экструдированный слой полиэтилена. Это обеспечивает простоту монтажа арматуры и исключает загрязнение окружающей среды, так как нет пропитывающей жидкости. В 1980-е годы основное внимание компании "Brugg" было сфокусировано на высоковольтных полимерных кабелях. Хорошие эксплуатационные показатели полимерных кабелей среднего уровня напряжения (до 60 кВ), продемонстрированные по всему миру, послужили предпосылкой успеха в высоковольтном диапазоне. Решительным шагом вперед была разработка сшиваемых полимерных изоляционных материалов, таких как XLPE (cross-linked polyethylene – сшитый полиэтилен с поперечной молекулярной связью) и EPDM (ethylene-propylene rubber – этиленпропиленовая резина), а также внедрение технологии одновременной экструзии внутреннего электропроводящего экрана, изоляционного слоя и внешнего электропроводящего экрана.

К 1996 году было изготовлено более 750 км высоковольтных полимерных кабелей для напряжений от 45 до 380 кВ. Наиболее значительными достижениями являются следующие:

- качество всех введенных в эксплуатацию кабелей подтверждено временем;
- они продемонстрировали высокие эксплуатационные характеристики. Единственной их слабой стороной можно считать тенденцию к развитию триингов (water-treeing). Этот недостаток можно предотвратить путем использования соответствующих средств, направленных непосредственно на предотвращение проникновения воды в изоляцию. Решению этой проблемы посвящены материалы главы 4.1.

- с 1982 г.** - несколько 110 кВ линий передачи для компании "North-East Switzerland Power Company" (Швейцария)

---
- 1985** - подводная линия, соединившая Моркот (Morcote) и Брусино (Brusino) в южной Швейцарии, и 132 кВ связь для железнодорожной компании "Swiss Federal Railways"

---
- 1990** - первый кабель, рассчитанный на напряжение 230 кВ, для компании "Ontario Hydro" (Канада)

---
- 1993** - экспериментальная опытно-промышленная линия на напряжение 400 кВ и сечением кабеля 1х800 мм<sup>2</sup> для компании "North-East Switzerland Power Company" (Швейцария)

---
- с 1993 г.** - несколько линий передачи напряжением 220 кВ в Ирландии, Китае, Саудовской Аравии, Египте и Швейцарии.