

И.Б. Пешков, д-р техн. наук, профессор,
президент Международной Ассоциации «Интеркабель»

Подводные кабели: современное состояние и тенденции развития. Обзор

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ

История подводных кабелей началась в первой половине XIX века [1–3]. Первый силовой подводный кабель с изоляцией из натурального каучука был проложен в Германии в 1811 г. [1]. Первый кабель связи – тогда телеграфный – был проложен в 1840 г. [2]. Этот кабель имел изоляцию из гуттаперчи, представляющей собой тягучую каучукообразную массу высушенного сока гуттаперчевого дерева, и уже через несколько недель эксплуатации вышел из строя. Однако работы в области подводных кабелей продолжались. В 1850–1851 гг. были проложены телефонные кабели через Ла-Манш, а в 1858 г. проложен первый трансатлантический подводный телеграфный кабель. В 1866 г. проложен второй трансатлантический кабель такого же типа. Прогрессу в области кабельной техники в целом, в том числе и в области подводных кабелей, в огромной степени способствовало открытие в 1837 г. Гудьиром явления вулканизации резины, заключающегося в сшивании поперечными связями в единую пространственную сетку молекул каучука. Важное значение имела также предложенная в 1850 г. броня из стальных круглых проволок, спирально накладываемых на кабель в виде сплошного повива. Поэтому после целого ряда попыток и прокладки нескольких коротких подводных линий в 1921 г. был проложен первый, к этому времени уже телефонный кабель между Флоридой и Кубой с двухслойной изоляцией: первый слой – гуттаперча, второй – резина. Только в 1950 г. были проложены подводные кабели с изоляцией из полиэтилена и резины на основе бутилкаучука. Затем развитие получили силовые подводные кабели постоянного тока с масляно-бумажной изоляцией (БПИ). Здесь необходимо выделить кабель на постоянное напряжение 100 кВ между островом Готланд и Швецией (1954 г.). Передаваемая мощность составила 20 МВт, а затем производилась прокладка дополнительных линий, по которым передавались все более увеличивающиеся мощности.

Следующий ключевой момент в развитии кабельной техники – разработка сшитого полиэтилена (СПЭ). Способ сшивания полиэтилена с помощью пероксидов был открыт Т. Энгелем в 1968 г. На основе этого способа была разработана технология промышленного производства полиэтиленовых труб из нового материала. Очень скоро технология сшивания полиэтилена была использована в кабельной технике для получения изоляции силовых кабелей переменного напряжения. Переход к использованию СПЭ для изоляции силовых кабелей постоянного тока занял длительный период времени в связи с возникшими техническими трудностями. После целого ряда опытных и исследовательских работ в 2000–2007 гг. был проложен подводный силовой кабель

постоянного тока с изоляцией из СПЭ между Норвегией и Голландией. Это – самый длинный подводный силовой кабель. Длина кабельной линии на напряжение 123 кВ и передаваемую мощность 700 МВт составляет 580 км. В это же время появляются силовые подводные кабели переменного тока с изоляцией из СПЭ, предназначенные для соединения береговой зоны с офшорными платформами, на которых добываются нефть и газ, а чуть позднее с офшорными ветропарками для производства электроэнергии.

Ключевым моментом в развитии техники в целом и кабельной техники в частности явилось создание оптических волокон. Такие волокна для передачи изображения были разработаны в 50-е годы XX века Американской оптической компанией и Королевским научно-техническим колледжем в Лондоне. Эти волокна сразу же нашли применение в световодах для визуального наблюдения внутренних органов человека. В 1966 г. Ч. Као и Дж.А. Хокмен (Standard Telecommunication Lab.) сформулировали требования к системе передачи информации по стеклянным волокнам, за что впоследствии Ч. Као был удостоен Нобелевской премии (2009 г.). В 1972 г. фирма Corning (США) получила оптическое волокно с затуханием передаваемого сигнала до 4 дБ/км, пригодное для промышленного использования, которое затем было доведено до высочайших характеристик по затуханию (~ 0,2 дБ/км) и до массового производства и применения в кабелях телекоммуникационного назначения. Как результат в 80-е годы начали прокладываться кабельные оптические системы. Так, в 1987 г. были проложены подводные оптические кабели между Великобританией и Бельгией, и Великобританией и Ирландией. В 1988 г. проложен трансокеанский подводный оптический кабель.

Применение подводных кабелей постоянного и переменного тока, подводных оптических кабелей продолжает расширяться.

СИЛОВЫЕ ПОДВОДНЫЕ КАБЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Силовые подводные кабели постоянного тока с масляно-бумажной изоляцией прокладывались и успешно эксплуатируются вплоть до настоящего времени. Основные типы таких кабелей – кабели с бумажной пропитанной изоляцией и маслонаполненные. В ограниченном количестве в подводных кабельных линиях в свое время использовались также газонаполненные кабели с изоляцией из предварительно пропитанных бумажных лент. Силовые подводные кабели постоянного тока используются для передачи электроэнергии на острова или в недоступные районы на материке, а также из стран, в которых имеется избыток электроэнергии,

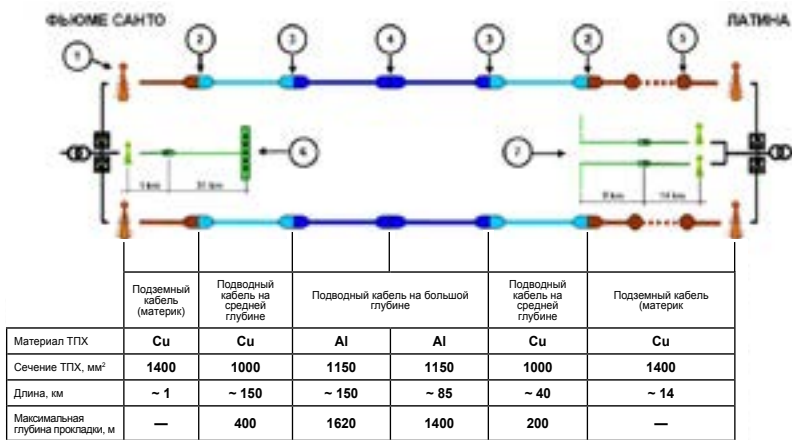


Рис. 1. Схема подводной кабельной линии Сардиния – материковая Италия на напряжение 500 кВ постоянного тока и передаваемую мощность 1000 МВт: 1 – концевая муфта; 2 – муфта берег–море; 3 – переходная муфта (установлена на глубине 200 м); 4 – соединительная муфта на большой глубине; 5 – соединительная муфта на берегу; 6 – электродная анодная система (в море); 7 – электродная катодная система (в море)

в страны, в которых электроэнергия не хватает, если эти страны разделены водным пространством. Подводные линии постоянного тока, как правило, состоят из двух кабелей (биполярная система, в которой используются 2 цепи с разной полярностью). Основной тенденцией в области подводных силовых кабелей постоянного тока является переход на использование в качестве изоляции СПЭ. Тем не менее, следует отметить, что кабели с масляно-бумажной изоляцией и в настоящее время не ушли полностью со сцены. Так, в 2010 г. была завершена в полном объеме прокладка подводной кабельной линии на напряжение 500 кВ между о. Сардиния и материковой Италией [4]. Схема кабельной линии показана на рис. 1.

Длина подводной части кабельной линии составляет 425 км, глубина прокладки достигает 1620 м. Конструкция проложенного кабеля показана на рис. 2.

Токопроводящая жила (ТПЖ) – алюминиевая, сечение ТПЖ – 1150 мм². Изоляция – пропитанная бумажная, толщиной 20 мм. Экраны по ТПЖ из полупроводящей

бумаги, экран по изоляции комбинированный: полупроводящая бумага плюс металлизированная бумага. Поверх экрана по изоляции наложена тканевая лента с медными нитями. Оболочка – из свинцового сплава типа Е. Поверх полиэтиленовой оболочки наложена полиэтиленрефталатная лента и двуслойная стальная броня из плоских проволок. Эта броня обеспечивает 85 % механической прочности. Наружный диаметр кабеля 119,2 мм. Соединительная муфта имеет изоляцию из пропитанной вязким составом бумаги, причем конструкция муфты такова, что в месте сродки диаметр муфты равен наружному диаметру кабеля. Переходная муфта имеет полугибкую конструкцию (глубина прокладки до 200 м). Подземный кабель, используемый на береговой части, имеет также пропитанную бумажную изоляцию.

Силовые подводные кабели постоянного тока с изоляцией из сшитого полиэтилена появились сравнительно недавно. Переход от бумажной изоляции, пропитанной вязкими составами, или бумажной изоляции с маслом на изоляцию из СПЭ в кабелях постоянного тока долгое время не мог быть осуществлен. При использовании традиционных типов СПЭ выяснилось, что опытные образцы кабелей при испытаниях быстро выходят из строя. Исследования показали, что при воздействии постоянного напряжения в изоляции из СПЭ накапливаются объемные заряды, искажающие распределение электрической напряженности в изоляции. В результате происходит электрической пробой кабелей, то есть получился неожиданный вывод: электрическая прочность полиэтилена, в том числе сшитого, при постоянном напряжении ниже, чем при переменном. Неожиданность вывода была связана с тем, что для пропитанной бумажной изоляции как раз наоборот: электрическая прочность при постоянном напряжении заметно выше, чем при переменном. Лишь в 1999 г. был создан новый тип СПЭ, который мог успешно применяться в качестве экструдированной изоляции кабелей постоянного тока. Такие кабельные линии начали прокладываться и

Сечение ТПЖ, мм ²	1150
Номинальный диаметр, мм	38,3
Внешний диаметр	119,2
Максимальная напряженность электрического поля при 500 кВ постоянного тока, кВ/мм	30,8
Вес, н/м	361
Вес в морской воде, н/м	254
Максимальное тяжение, кН	530
максимальный радиус изгиба, м	3

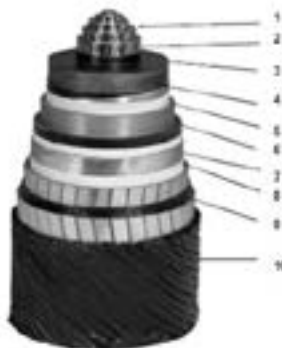


Рис. 2. Конструкция подводного кабеля с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 500 кВ постоянного тока, используемого в линии электропередачи Сардиния – материковая Италия 1 – токопроводящая жила из алюминия; 2 – экран по жиле из полупроводящей бумаги; 3 – бумажная изоляция, пропитанная вязким компаундом; 4 – экран по изоляции из полупроводящей и металлизированной бумаги; 5 – оболочка из свинцового сплава; 6 – оболочка из полиэтилена; 7 – металлическая усиливающая лента; 8 – полиэтиленрефталатная лента; 9 – двуслойная броня из плоских стальных проволок; 10 – защитный покров из полипропиленовой пряжи



Рис. 3. Общий вид подводного кабеля с экструдированной изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение постоянного тока ± 200 кВ, используемого в линии электропередачи через залив Сан-Франциско (США)

вводиться в эксплуатацию в первом десятилетии нашего века. Первый в мире подводный кабель постоянного тока с экструдированной изоляцией на напряжение ± 200 кВ, использованный для коммерческой эксплуатации, был проложен через залив Сан-Франциско в США в 2009–2010 гг. [5]. Кабельная линия имеет длину 88 км и передает мощность до 400 МВт. Кабель проложен на дне на глубине 1,8 м от поверхности дна на безопасном расстоянии от имеющихся кабельных трасс переменного тока. Конструкция этого кабеля показана на рис. 3.

ТПЖ кабеля медная уплотненная, сечение 1100 мм². Ток в линии до – 1050 А. Пространство между скрученными проволоками заполнено компаундом, блокирующим продольное распространение воды. Экраны по ТПЖ и изоляции изготовлены из полупроводящей сшиваемой композиции. Между наружным полупроводящим слоем и металлическим экраном наложена полупроводящая водонабухающая лента, также предотвращающая распространение влаги вдоль кабеля. Металлическая оболочка – из свинцового сплава. Поверх этой оболочки методом экструзии наложено полиэтиленовое покрытие. Броня состоит из одного слоя оцинкованной проволоки. Наружное покрытие брони – из полипропиленовой пряжи, которая имеет пониженный коэффициент трения и облегчает прокладку. Для каждого из биполярных кабелей полипропиленовая пряжа имеет разный цвет: черный и желтый.

Для обеспечения высокого качества подводных кабелей с изоляцией из СПЭ исключительно важное значение имеет разработка технологии их производства. Схема производства подводного кабеля постоянного тока, проложенного через залив Сан-Франциско, показана на рис. 4.

Изготовленный кабель и муфты были подвергнуты целому комплексу как заводских испытаний, так и испытаний в составе всей линии.

Заводские испытания подводного кабеля предусматривали три этапа:

- экструдированная изоляция из СПЭ испытывалась напряжением переменного тока;
- гибкие соединительные муфты испытывались напряжением переменного тока и подвергались рентгеновскому анализу;
- весь кабель длиной 83 км вместе с соединительными муфтами испытывался постоянным током в соответствии с рекомендациями TB CIGRE № 219.

Типовые испытания кабеля были проведены в соответствии с рекомендациями TB CIGRE № 219 для системы $U_o = 200$ кВ:

- испытательное напряжение 290 кВ при 70 °С;
- $U_{p2,5} = 430$ кВ;
- $U_{p2,0} = 250$ кВ;
- испытание грозовым импульсом обеих полярностей, $U_{p1} = 400$ кВ.

Кабели переменного тока, соединяющие преобразовательные станции с электрическими подстанциями, имеют соответственно сечение 1200 мм², изоляцию из СПЭ, напряжение 230 кВ (стандарт МЭК 62067); сечение 1200 мм², изоляцию из СПЭ, напряжение 115 кВ (стандарт МЭК 60840). Жилы медные.

После прокладки кабели постоянного и переменного тока были испытаны в соответствии с действующими

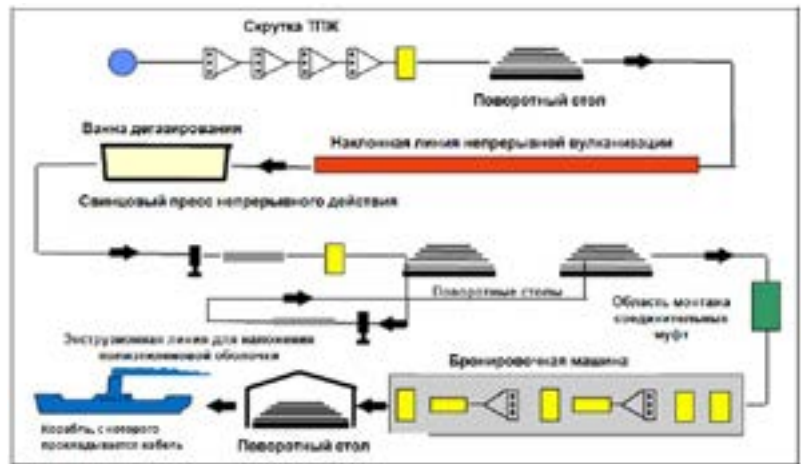


Рис. 4. Схема производства подводного кабеля постоянного тока, проложенного через залив Сан-Франциско:

стандартами. 200 кВ кабель постоянного тока был испытан постоянным напряжением 290 кВ (с переменной полярности) в течение 15 минут. 230 кВ кабель переменного напряжения был испытан напряжением 228 кВ в течение 1 часа. 115 кВ кабель переменного тока был испытан аналогично при напряжении 128 кВ в течение 1 часа. Защитная оболочка кабелей проверялась напряжением 10 кВ в течение 1 минуты в соответствии со стандартами МЭК.

СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДЛЯ ПИТАНИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЛАТФОРМ И ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ОФШОРНЫХ ВЕТРОПАРКОВ

Развитию производства силовых подводных кабелей переменного тока способствовали новые факторы, появившиеся в последние 10–20 лет и связанные с размещением источников или потребителей электроэнергии в море или на офшорных территориях [2]. К таким факторам относятся следующие. Это, прежде всего, расширение разведки и добычи нефти на офшорных территориях. Платформы в море имеют собственные электростанции, но часто этого недостаточно. Так что в будущем возможно дополнительное использование подводных кабельных линий с материковой территории. Еще быстрее растет рынок передачи электроэнергии от ветропарков, устанавливаемых в море. Так, в 2008–2009 гг. более 50 % всего рынка высоковольтных кабелей составляли подводные высоковольтные кабели, причем заметную роль начали играть кабели, проложенные между материком и офшорами. Электроэнергия от турбины ветрогенератора передается по кабелям среднего напряжения на центральную трансформаторную станцию, а затем по кабелю высокого напряжения – на подстанцию на берегу материка. Одним из факторов, способствующих этому процессу, является активная деятельность «зеленых», связанная с негативным влиянием строящихся линий электропередачи на окружающую среду. Поэтому в ряде случаев приходится не строить линию электропередачи на материковой территории, а прокладывать подземную кабельную линию вдоль побережья. Так, в частности, по этой причине предполагается проложить подводную кабельную линию вдоль западного побережья Велико-

Основные характеристики кабельных линий, соединяющих в Дании офшорные ветропарки с энергосистемами

Наименование характеристик	Линия в Хорис Рев		Нистед	
	Подводный кабель	Подземный кабель	Подводный кабель	Подземный кабель
Тип кабеля	Трехжильный с изоляцией из СПЭ с индивидуальными свинцовыми оболочками каждой жилы	Одножильные с изоляцией из СПЭ, проложенные в треугольник	Трехжильный с изоляцией из СПЭ с индивидуальными свинцовыми оболочками каждой жилы	Одножильные с изоляцией из СПЭ, проложенные в треугольник
Номинальное напряжение, кВ	150		132	
Передаваемая мощность, МВт	160		158,4	
Минимальное рабочее напряжение, кВ	146		130	
Минимальный ток, А	633		703	
Сечение токопроводящей жилы кабеля, мм ²	630 (медь)	1200 (алюминий)	760 (медь)	1200 (алюминий)
Транспозиция оболочек кабелей (cross-bonding)	отсутствует	имеется	отсутствует	имеется
Длина (приблизительно), км	21	35	11	18
Компенсаторы реактивной мощности	Компенсатор мощностью 80 МВар (при 170 кВ) установлен в Оксби при переходе от подводного к подземному кабелю		Компенсатор мощностью 40 МВар (при 132 кВ) установлен на 132 кВ – подстанции в Радштедте	

британии. Типы кабелей, применяемых для передачи электроэнергии от офшорных ветропарков на материк, рассматриваются ниже.

В Дании установлено два больших офшорных ветропарка [6]. Один из них расположен в Хорнс Рев в Северном море, другой – в Нистед в Балтийском море (юг острова Лолланд). Номинальная передаваемая мощность этих систем составляет соответственно 160 и 165 МВт; ежегодно передаваемое количество электроэнергии составляет около 600 ГВт·ч. На обоих концах линии подстанции устанавливаются на платформах. Рабочие напряжения кабелей в вышеуказанных системах 150 кВ и 132 кВ соответственно. Кабельные линии состоят из подводного и подземного кабеля. Основные характеристики кабельных линий приведены в табл. 1.

Трехжильный подводный кабель с изоляцией из СПЭ на напряжение 115 кВ имеет длину 52 км и соединяет побережье Аравийского полуострова с нефтяной платформой в Саудовской Аравии [7]. Сечение медной ТПЖ 490 мм² (1000 Kcmil).

В протяженных подводных кабелях морские волны могут индуцировать во внутренних оболочках высокое наведенное электрическое напряжение, что может привести к пробое оболочки, если не приняты соответствующие меры. В условиях нормальной эксплуатации продольные электрические напряжения индуцируются в металлической оболочке, радиальные электрические напряжения – во внутренней оболочке. Один из путей исключить возникновение высоких наведенных напряжений – сделать внутреннюю оболочку полупроводящей. Потери в оболочке могут быть также уменьшены сведением емкостной составляющей токов к нулю, то есть исключением зарядного тока в оболочке.

На рис. 5 приведена конструкция такого трехжильного подводного кабеля. В качестве заполнителя применяются волокна из полимерного материала, причем расположение этих волокон позволяет предусмотреть в конструкции кабеля и оптический кабель. Коэффициент трения между волокнами заполнителя и поверхностью оптического кабеля низкий, что исключает риск повреждения оптического кабеля при прокладке основного подводного кабеля.

Для улучшения теплопроводности и предотвращения возможного повреждения эти волокна автоматически наполняются водой при погружении подводного кабеля в воду. Броня кабеля из стальных проволок, однослойная. Стальные проволоки оцинкованные, и для повышения коррозионной стойкости имеют дополнительное битумное покрытие. Максимальная глубина прокладки подводного кабеля, соединяющего побережье Аравийского полуострова с нефтяной платформой, приблизительно 50 м.

В протяженном подводном кабеле с изоляцией из СПЭ генерируется реактивная мощность, которая меньше, чем в аналогичном кабеле с изоляцией из этиленпропиленовой резины или в маслonaполненном кабеле. Тем не менее, на обеих сторонах подводной кабельной линии установлены компенсирующие устройства, так как передача по линии реактивной мощности может привести к потерям передаваемой энергии.

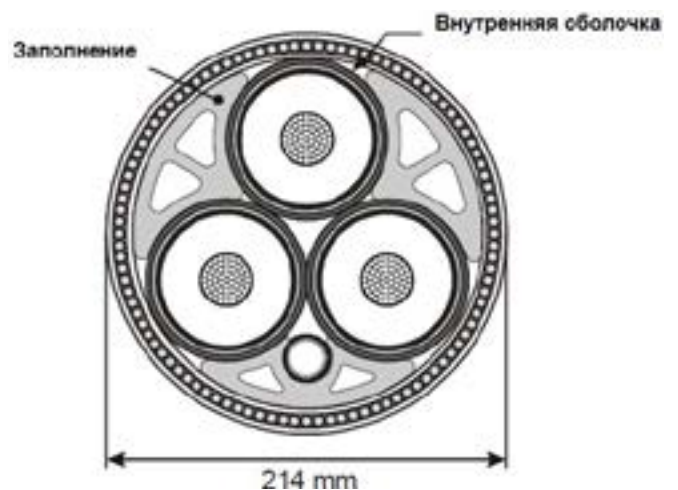


Рис. 5. Конструкция трехжильного подводного кабеля переменного тока на напряжение 115 кВ, проложенного между побережьем Аравийского полуострова и нефтяной платформой

Квалификационный контроль кабельной линии включает испытание напряжением переменного тока и измерение частичных разрядов (ЧР) в изоляции.

Приемно-сдаточные испытания на заводе-изготовителя предусматривают приложении напряжения переменного тока величиной 160 кВ ($2,5 U_0$) в течение 30 мин. Так как длина кабельной трассы вместе с соединительными муфтами составляет 52 км, то эти испытания необходимо проводить после каждой соединительной муфты.

При высоковольтных испытаниях напряжением переменного тока используется резонансно-частотное оборудование, рассчитанное на максимальное напряжение 200 кВ и ток 200 А (частота выше 35 Гц).

Уровень измеренных ЧР в линии находится в пределах 1,6–4,6 пК (в 2 раза выше уровня шумов). Измерение ЧР производится также специальным методом с целью фиксации дефектов в изоляции. В этом случае пиковое значение ЧР составляет 9 пК при напряжении 180 кВ.

Кабельная линия между платформой Гёйа, находящейся в Норвегии на расстоянии около 100 км от г. Бергена, имеет длину 101 км и проложена на глубине 550 м [8]. Основные компоненты этой кабельной линии показаны на рис. 6.

В кабельной линии часть кабеля (при переходе от подводной части к берегу) подвергается динамическим нагрузкам; часть кабеля между проходными муфтами испытывает только статические нагрузки. Изоляция кабеля – СПЭ, рабочее напряжение 115 кВ, кабель трехфазный. Длина кабеля, подвергнутого в воде динамическим нагрузкам, равна 1,5 км; длина кабеля, подвергнутого статическим нагрузкам, – 99,5 км. Кабель, подвергающийся динамическим нагрузкам, имеет двухслойную броню и сварную медную оболочку, обеспечивающую радиальную герметичность кабеля и одновременно выполняющую роль экрана. Кабели, подвергающиеся динамическим и статическим нагрузкам, соединены между собой переходными муфтами.

В кабель интегрированы 48 оптических волокон, которые используются для связи платформы с берегом, температурного мониторинга кабеля, а также для регулирования электрической сети на платформе. Конструкция кабеля разработана с учетом возрастающих требований по защите окружающей среды и имеет повышенную надежность за счет того, что традиционная свинцовая оболочка заменена на сварную медную, выдерживающую экстремальные механические нагрузки. Передаваемая пиковая мощность 40 МВт, в среднем 25–30 МВт. Линия сконструирована таким образом, что кабель выдерживает динамические нагрузки, возникающие не только в связи с воздействием волн, но и с учетом того, что нефтегазовая платформа может перемещаться в пределах круга с радиусом 75 м. Максимально допустимое динамическое напряжение, возникающее в кабеле, соответствует воздействию силы 56 т, например, в условиях шторма на море.

Кабель, подвергающийся статическим нагрузкам, специальной разработки не требовал, и его конструкция традиционна (медная ТПЖ, изоляция из СПЭ, оболочка из свинцового сплава, двухслойная броня из стальных оцинкованных проволок и т.д.). Следует отметить, что под свинцовой оболочкой наложена водонабухающая полупроводящая лента, обеспечивающая продольную герметичность кабеля. Полупроводящее полиэтиленовое



Рис. 6. Основные компоненты подводной кабельной линии переменного тока между побережьем Норвегии и нефтяной платформой Гёйа

покрытие поверх металлической оболочки усиливает её механическую защиту. Полупроводящее покрытие также сглаживает возникновение зарядных токов в свинцовой оболочке. Оптический кабель, содержащий 48 оптических волокон, расположен в межфазном пространстве трехжильного кабеля. Полиэтиленовое покрытие сварной медной оболочки является герметичным барьером для проникновения воды к оптическим волокнам и диффузии водорода. Два слоя брони проволок разделены лентой, играющей роль подушки. Проволоки битумнированы, что защищает броню от коррозии. Наружное покрытие кабеля состоит из двух слоев полипропиленовой пряжи, причем внутренний слой пропитан битумным компаундом.

Кабель, подвергающийся динамическим нагрузкам, трехфазный. Сечение медной ТПЖ – 300 мм², гофрированная медная оболочка, двухслойная броня. Кабель рассчитан на срок службы 35 лет в условиях воздействия механических усталостных напряжений. ТПЖ скрученная и уплотненная. Продольная герметизация ТПЖ обеспечивается заполнением межпроволочного пространства полимерным компаундом, совместимым как с проволоками ТПЖ, так и с экраном по ТПЖ. Поверх ТПЖ накладывается водонабухающая полупроводящая лента. Радиальная герметизация обеспечивается медной сварной гофрированной оболочкой. Конструкция оболочки также предусматривает отвод токов КЗ в случае замыкания одной из фаз кабельной линии. С точки зрения противостояния многократным механическим напряжениям одной свинцовой оболочки кабеля недостаточно. Из 48 оптических волокон, используемых в кабеле, 46 одномодовых и 2 многомодовых. Многомодовые волокна используются для температурного мониторинга кабельной линии. Для увеличения соотношения вес/диаметр в межфазное пространство помещаются два свинцовых прутка. Поверх брони из стальных проволок, оцинкованных гальваническим способом, накладывается полиэтиленовая оболочка, препятствующая истиранию брони при действии динамических нагрузок.

Конструкция соединительной муфты между кабелем, подвергающимся динамическим нагрузкам, и кабелем, подвергающимся статическим нагрузкам, такая же, как у переходных (стопорных) муфт. Различие этих муфт только в количестве и типе металлических проводников, соединенных с кожухом муфты. Соединительные муфты фактически состоят из трех муфт (для каждой фазы) в герметичном кожухе, одной муфты для оптического кабеля и общего жесткого кожуха для механической защиты и равномерного распределения нагрузки между длинами.

При проведении разработки основное внимание пришлось уделить усталостным характеристикам и прочности гофрированной медной оболочки.

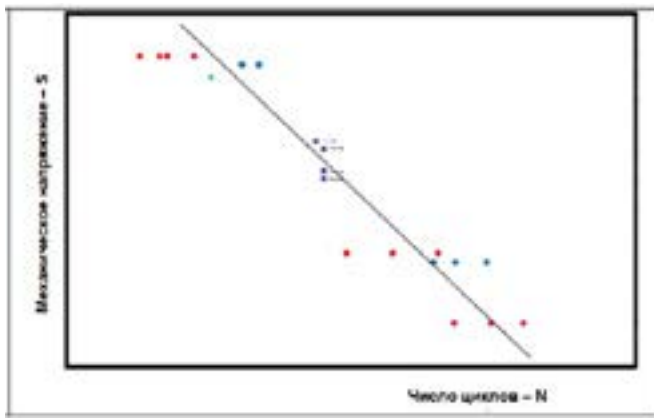


Рис. 7. Зависимость механической деформации сердечника подводного кабеля переменного тока, проложенного между побережьем Норвегии и нефтяной платформой Гея

Усталостные характеристики металлов обычно характеризуются так называемым S-N графиком, представляющим собой зависимость механической деформации S от числа циклов N до разрушения. В рассматриваемом случае такая зависимость представлена на рис. 7.

В качестве образца для испытаний использован сердечник кабеля (от ТПЖ до сварной оболочки). Образцы испытывались при различных изгибающих нагрузках. Время до разрушения фиксировалось специальным устройством. Затем образец окрашивался пенетрирующей жидкостью для обнаружения микроскопических трещин. Кроме того, разрабатываемый кабель успешно выдержал воздействие давления 60 бар и более.

Переходная муфта сконструирована в расчете на глубину 600 м и максимальное растягивающее усилие при прокладке 44 т. Для гарантии надежности муфты были проведены следующие испытания:

- испытание на давление 60 бар в течение 14 суток, включая три цикла снижения давления;
- измерение сопротивления изоляции после проведения испытаний на давление;
- визуальный осмотр после проведения испытаний на давление;
- испытание защитной противокоррозионной оболочки напряжением 12 кВ;
- визуальный осмотр после проведения испытаний электрическим напряжением;
- механические испытания, которые включали испытания образцов с бронепокровами вплоть до тяжения силой 840 кН и комплексные испытания кабелей с жесткой соединительной муфтой вплоть до тяжения силой 440 кН.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ

Первые волоконно-оптические кабели были проложены в водном пространстве Европы и Японии в 80-е годы. В 1988 г. был проложен первый трансатлантический кабель, содержащий 6 одномодовых оптических волокон, передающий информацию на длине волны 1300 нм. В дальнейшем число подводных оптических линий непрерывно увеличивалось, а требования к ширине полосы пропускания телекоммуникационных линий повышались. Факторами, влияющими на развитие оптических кабелей, в том числе подводных, являются следующие [2]:

- Необходимость расширения полосы пропускания передаваемого сигнала и повышения скорости передачи в связи



Рис. 8. Расширение полосы передачи по волоконно-оптическим кабелям за период 1987–2010 гг.

с появлением Интернета. Расширение полосы передачи за период 1987–2010 гг. показано на рис. 8. Скорость передачи росла от Мбит/с до Гбит/с, а затем и до Тбит/с. В результате некоторые цепи линий используются для передачи голосовой информации, а цепи, передающие информацию со скоростью до 10 Гбит/с, проданы операторам Интернета.

- Рост передач Интернета в среднем на 32 % в год; при этом в развивающихся регионах мира эта цифра значительно выше.
- Развитие и расширение выпуска мобильных телефонов, смартфонов, айфонов, устройств типа I-pad и т.д., в результате чего создаются и развиваются информационные системы для обеспечения необходимого сервиса.

В результате потребовались волоконно-оптические кабельные линии сначала между Европой и Северной Америкой, а затем и телекоммуникационные системы в Южной Азии и Африке. Экономически выгодным оказалось создавать информационные центры в Исландии, где стоимость электроэнергии невысока, и в Швеции и Гренландии, где климат привлекателен с точки зрения минимальных затрат на кондиционирование. Подводные волоконно-оптические кабельные трассы обеспечивают задержку передаваемого сигнала до 64,8 мс (трансатлантическая линия AC-1). По всей длине таких подводных кабельных линий обеспечивается также контроль дисперсии и затухания оптического сигнала за счет применения новых оптических волокон с особыми характеристиками. Скорость передачи по этим линиям повышена до 1 Тбит/с. Количество эффективно используемых длин волн, на которых ведется передача сигнала по подводным кабельным линиям, увеличено за счет разработанной технологии мультиплексирования и демуплексирования (WDM-системы). Прогресс в этой области был достигнут в последние 10–15 лет. В настоящее время WDM-системы используются в трех кабельных линиях (TAT-12 – 3 длины волны; TPC-5 – 2 длины волны; линия в Японии, рассчитанная на 4 длины волны).

Из трансатлантических подводных телекоммуникационных систем в настоящее время используется только линия TAT-14, так как появились новые эффективные системы (AC-2, Apollo, Gemini и др.). Скорость передачи сигнала непрерывно повышается. Так, в 2012 г. была проложена первая коммерческая линия между Египтом и Италией, в которой используется скорость передачи 100 Гбит/с, хотя в большинстве систем скорость передачи сигнала составляет до 40 Гбит/с.

РЫНОК ПОДВОДНЫХ КАБЕЛЕЙ И ЕГО ПЕРСПЕКТИВЫ

Мировой рынок подводных кабелей непрерывно расширяется. Рис. 9 иллюстрирует расширение прокладки силовых подводных кабельных линий в период 2008–2011 гг.

Падение этого рынка было в 2008–2009 гг. связано с известным мировым экономическим кризисом, но уже в 2010 г. отмечен резкий рост и возврат к положению, существовавшему до кризиса. Быстрый экономический рост в густонаселенных районах предполагает, что потребление электроэнергии будет увеличиваться. Поэтому не только общий рынок кабельной продукции, в том числе рынок силовых подводных кабелей, должны развиваться. Не последнее место на этом рынке займут кабельные линии, связывающие офшорные территории с материком, тем более, что многие страны, особенно в Европе, стремятся уменьшить зависимость от монопольных производителей

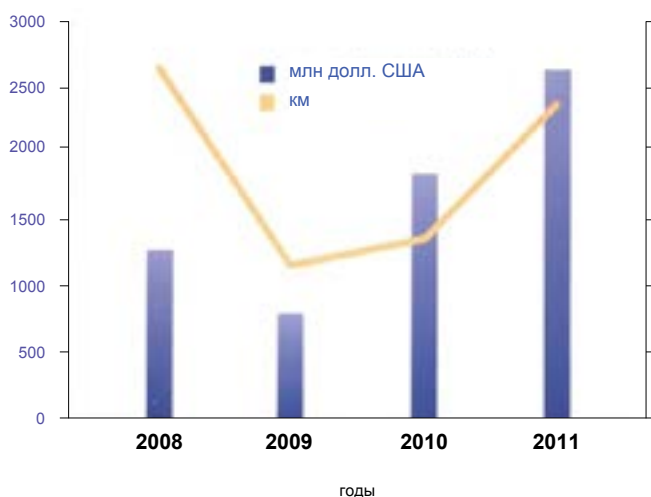


Рис. 9. Рынок силовых подводных кабелей в 2008–2011 гг.

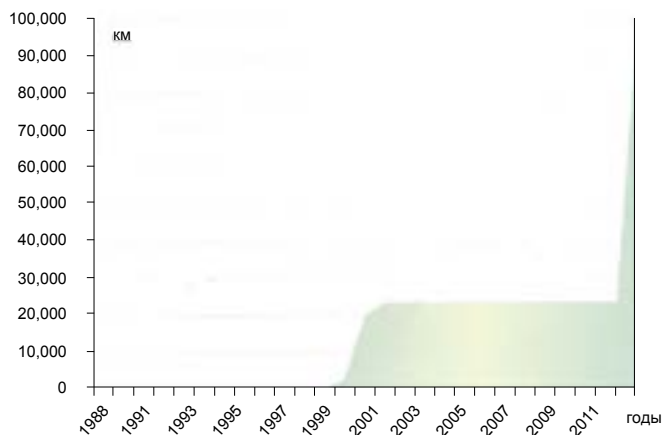


Рис. 10. Длина волоконно-оптических подводных трансатлантических кабельных систем, проложенных в 1988–2012 гг.

нефти, газа и электроэнергии. Рынок волоконно-оптических подводных кабелей развивается волнообразно. На рис. 10 показаны длины волоконно-оптических трансатлантических подводных кабельных систем, проложенных в 1988–2012 гг.

Этот рынок пережил заметное падение в 2003–2005 гг., вызванное кризисом в зоне телекоммуникационных систем, когда были переоценены потребности общества в существовавших тогда системах связи. Однако последующий общий мировой кризис мало повлиял на подводные системы связи. В настоящее время рынок волоконно-оптических подводных кабелей успокоился. Можно сказать, что сейчас этот рынок рационализируется для создания в будущем дополнительных емкостей передачи информации.

В целом прокладка как силовых, так и волоконно-оптических подводных кабелей приводит к росту инвестиций на материке и решению многих социальных вопросов для населения. Поэтому можно констатировать, что в области подводных кабелей для кабельной промышленности просматриваются новые возможности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Равич И.С., Шарле Д.Л. Подводные кабельные магистрали связи. – М.: Связь, 1971.
2. Undersee Cables: Supporting Growth in offshore Energy and Internet Bandwidth. ICF News, Issue 71, September 2012.
3. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. – М.: Энергоатомиздат, 1996.
4. R. Redina, A. Gualano, M.R. Guarniere, G. Paziienza (TERNA, Italy); E. Colombo, S. Malgarotti (CESI, Italy); F. Bocchi, A. Orini, T. Struchio, S. Aleo (Prysmian, Italy). Qualification Test Program for the 1000 mW – 500kV HVDC Verydeep Water Submarine Cable Interconnection between Sardinia Island and Italian Peninsula (SA. PE.I). Presentation B1-104, CIGRE 2008.
5. M. Bacchini, R. Grampa, M. Marelli (Prysmian Powerlink, Itali); T. Westerweller (Siemens, Germany); N. Kelly (Prysmian Power

- Cables and Systems, USA). 200 kV DC extruded cables crossing the San Francisco Bay. B1 105 2010, CIGRE 2010.
6. H.J. Jorgensen, J. Hjerrild, C. Jensen and J. Havsgaard (DEFU, ELTRA and Elkraft System, Denmark). Improved Operation of Cables connecting offshore Wind Farms to the Power Grid. B 1-201, CIGRE 2004.
7. J. Karlstrand, G. Henning, M. Sjoberg, A. Ericsson. (ABB Power Technologies AB, High Voltage Cables, Karlskrona, Sweden). Three-core HV XLPE Submarine Cables for Offshore application. B 1-110, CIGRE 2006.
8. M. Jeroense, M. Larsson-Hoffstein, C. Sonesson, R.O. Rad (ABB AB, High Voltage Cables, Sweden; Statoil, Norway). HV AC Power Transmission to the Geja Platform. B 1-107, CIGRE 2010.