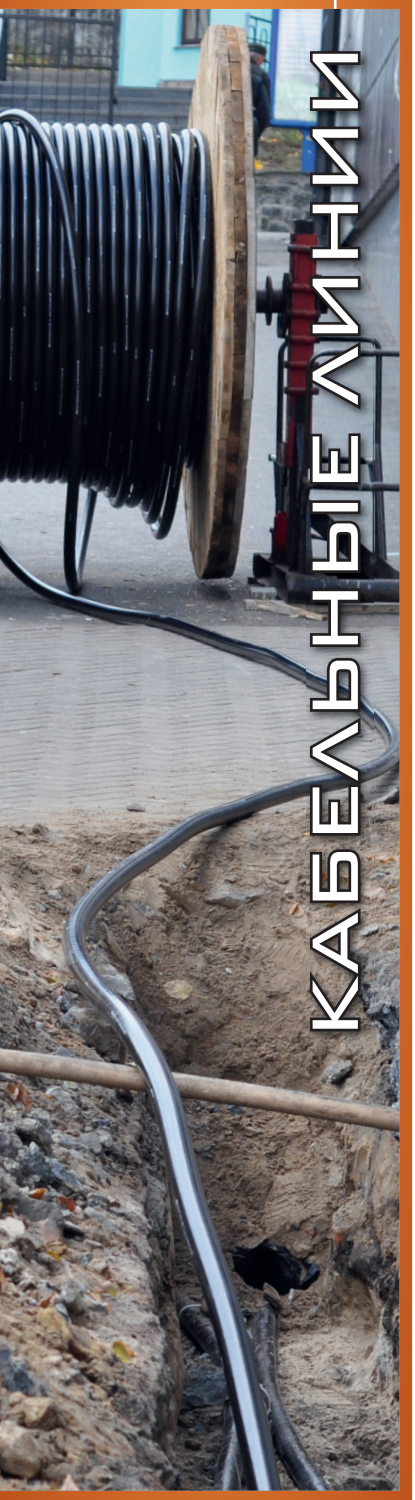


Тенденции в кабельной отрасли: HVAC и HVDC. Обзор 51-й сессии СИГРЭ

В последнюю неделю августа во Франции в Париже проходила большая сессия СИГРЭ, включающая в себя как выставку новой продукции и технологий, так и многочисленные конференции и заседания рабочих групп по разнообразным тематикам (оборудование, линии электропередачи, управление сетями и проч.). Сессия СИГРЭ проводится каждые 2 года и является значимым событием для мировой электроэнергетической индустрии, в том числе и для отечественной, представители которой также участвуют в работе. Хотя СИГРЭ занимается широким кругом проблем, в данном обзоре затронем лишь то из представленного на выставке в августе 2026 года, что показалось интересным в области силовых кабельных линий.

Дмитриев М.В.,
к.т.н., доцент

СИГРЭ — это международный совет по большим электрическим системам высокого напряжения. Организация хорошо известна специалистам отрасли, отчасти благодаря тем публикациям (техническим брошюрам ТВ и журналу Electra), которые выпускаются на совершенно разные темы, имеющие отношение к электроэнергетике. В настоящее время основная деятельность СИГРЭ разделена по направлениям, и за каждое из них отвечает та или иная рабочая группа (например, вопросами КЛ занимается группа B1, а вопросами ВЛ — группа B2). Каждый инженер может стать членом этой организации, обратившись к ее национальному представителю (например, для этого можно использовать сайт Cigre.ru).

Обзор сессии СИГРЭ сфокусируем только на кабельных линиях (B1) и, прежде всего, на представленных заводами образцах продукции. Разделим обзор на категории:

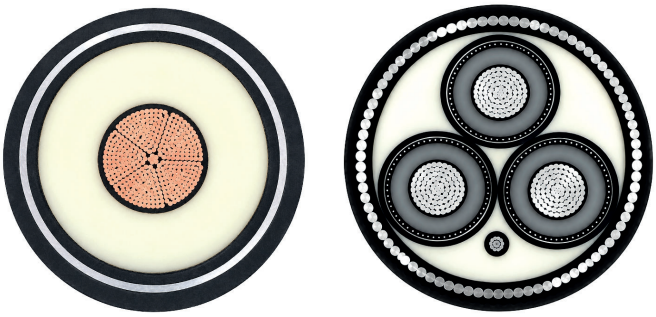
– HVAC-кабели;
– HVDC-кабели;
– системы крепления кабелей;
– умные коробки транспозиции.

Многие из образцов продукции показались интересными и даже вдохновляющими, но были и те, что можно было бы назвать «сырыми», пока еще не готовыми к эксплуатации.

HVAC-КАБЕЛИ

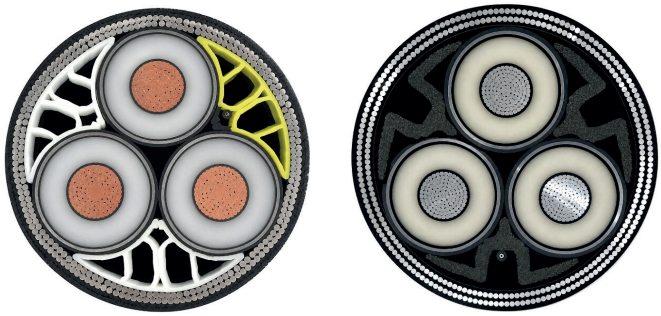
После посещения экспозиции сложилось устойчивое впечатление, что кабельные заводы соревнуются друг с другом с точки зрения своей способности производить кабели все большего номинального напряжения и сечения жилы, при этом реальная потребность в подобных «супер-кабелях» как будто бы никого не интересует. В качестве примера на рисунке 1а показан кабель класса напряжения 750 кВ (напряжение «жила-экран» 435 кВ), и, честно говоря, не вполне понятно, а где именно такой кабель может быть применен на практике, и насколько надежна изоляция, работающая на пределе своих возможностей. Интересно, что данный кабель был представлен одним из китайских кабельных заводов, и в целом тенденции последних лет таковы, что доля предприятий Китая на всех мировых отраслевых мероприятиях год от года постоянно увеличивается.

Жила кабеля, показанного на рисунке 1а, является стандартной жилой Milliken, состоящей из центрального круглого элемента и 5 секторов, размещенных вокруг него. В целом, согласно сложившейся практике, жилы типа Milliken характерны для всех HVAC-кабелей (кабели переменного тока высокого напряжения), если их сечение составляет:



750 kV, 1×2500 mm², Milliken — а)
66 kV, 3×800 mm² — б)

Рис. 1. Примеры вариантов исполнения жилы HVAC-кабелей



420 kV, 3×2000 mm² — а)
500 kV, 3×2000 mm² — б)

Рис. 2. Примеры вариантов исполнения жилы HVAC-кабелей морского исполнения

– для жилы из меди — более 1000 мм²;
– для жилы из алюминия — более 1200 мм².

Для дополнительной иллюстрации этого известного правила на рисунке 1б также показан кабель с сечением алюминиевой жилы всего 800 мм², и видно, что конструкция жилы здесь действительно обычная многопроволочная, а вовсе не Milliken, применяемый лишь для жил сечением более 1000–1200 мм². Однако после внимательного изучения всех представленных на СИГРЭ вариантов кабелей оказалось, что на самом деле применение жилы типа Milliken подчиняется более сложным правилам, о которых большинство инженеров-кабельщиков, вероятно, даже и не подозревают. Итак, давайте обратимся к рисунку 2, где показаны HVAC-кабели сечением жилы 2000 мм² из меди (слева) и алюминия (справа).

Несмотря на значительное поперечное сечение жилы, HVAC-кабели рисунка 2 не имеют Milliken, что может вызывать недоумение, ведь на переменном токе (частоты 50 Гц или 60 Гц) для таких жил поверхностный эффект уже ярко выражен, и ток занимает не все поперечное сечение, а только его внешнюю часть, делая «бесполезной» центральную часть весьма дорогостоящего проводника.

Общение со специалистами заводов, производящих кабели вида рисунка 2, дало возможность прояснить ситуацию. Оказывается, для морских кабелей чрезвычайно важно обеспечить максимальную степень продольной герметизации жилы, и этого не удается достичь для жил типа Milliken. Таким образом, для морских кабелей на переменном токе, выбирая между решением проблемы поверхностного эффекта в жиле (тут хорош Milliken) и решением проблемы герметизации (напротив, следует отказаться от Milliken), заводы в большей степени заинтересованы в обеспечении герметизации, то есть в отказе от Milliken. Разумеется, это приводит к неэффективному использованию поперечного сечения жилы подобных морских кабелей, к снижению допустимого тока КЛ и повышенным потерям активной мощности. Одним из способов разрешения указанных противоречий, связанных с Milliken, является переход от технологии HVAC к технологии HVDC, где полностью отсутствуют проблемы поверхностного эффекта в жиле, и при проектировании кабеля следует заниматься только лишь решением проблем герметизации.

HVDC-КАБЕЛИ

На рисунке 3 показаны примеры современных морских HVDC-кабелей. Видно, что конструкция жилы заметно отличается от рассмотренных ранее вариантов, характерных для HVAC-кабелей. Перед нами не многопроволочная жила и не жила Milliken, а очень компактная жила, где за счет специальной формы проволок они плотно примыкают друг к другу — такая конструкция жилы получила название Keystone. Подобная конструкция жилы обладает не только повышенной продольной герметичностью, но также и высокой компактностью, что важно для снижения диаметра кабеля, его веса и стоимости.

Рисунок 3 интересен еще и тем, что показанные там поперечные сечения жилы являются рекордсменами для современной кабельной отрасли и составляют:
– для жилы из меди — 4000 мм²;
– для жилы из алюминия — 5000 мм².

Указанные сечения были представлены китайскими компаниями, и пока не ясно — являются ли они опытной продукцией или уже находят свое практическое применение. Тем не менее, чтобы показать серьезность намерений применять на практике подобные кабели с большим сечением жилы, рядом с образцами кабелей можно было найти также и макет муфты для их последовательного соединения, показанный на рисунке 4. Скорее всего перед нами именно макет, так



± 525 kV, 1×4000 mm² — а)
± 525 kV, 1×5000 mm² — б)

Рис. 3. HVDC-кабели морского исполнения. Жила типа Keystone



Рис. 4. Разрез макета муфты для соединения кабелей, показанных на рисунке 3



Рис. 5. Необычный HVDC-кабель морского исполнения

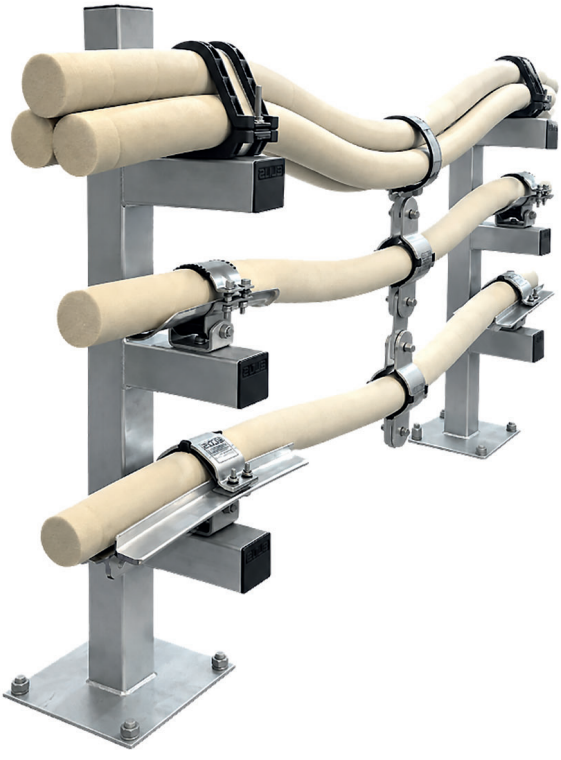
как обычно соединительная муфта морских кабелей выполняется в специальном защитном корпусе, массивна и имеет длину до 3–5 метров.

Справедливости ради следует сказать, что все же первой компанией, изготовившей кабель с медной жилой сечением 4000 мм², стала компания Prysmian со штаб-квартирой в Италии, а китайские компании здесь скорее выступают в роли догоняющих. Но все же масштаб трансформации отрасли очевиден — если раньше большим поперечным сечением жилы считалось 1000 мм², потом 2500 мм², то теперь уже есть реализованные проекты с кабелями сечением 3000, 3200, 3500 мм², и стали появляться запросы на 4000–5000 мм². Разумеется, кабели подобных сечений жилы — это исключительно морские HVDC-кабели, которые поставляются к месту укладки на специальных кораблях-кабелеукладчиках.

Глядя на наметившуюся тенденцию роста сечений свыше 2500 мм², специалисты отрасли поняли, что здесь имеется значительное число нерешенных вопросов, таких как механические и электрические расчеты, а также испытания кабелей. Например, известно не так много серийных приборов и методик, которые могли бы позволить точно измерить сопротивление жилы, если она имеет столь значительное поперечное сечение. Для решения указанных вопросов в 2026 году в СИГРЭ создана специальная рабочая группа, которая получила номер B1.102.

Рассмотрев особенности конструкции жилы современных HVAC- и HVDC-кабелей, можно заключить, что здесь есть два правила. Первое заключается в том, что жила Milliken применяется только для HVAC-кабелей (так как только для них бывает поверхностный эффект). Второе заключается в том, что из всех вариантов HVAC- кабелей (подземных и морских) жила Milliken применяется только для подземных кабелей.

Понимая эти два правила, которые сформировались в кабельной отрасли и которых придерживаются большинство современных кабельных заводов мира, следует признать, что среди образцов кабелей, представленных на СИГРЭ-2026, сразу же нашелся образец, показывающий нарушение обоих этих правил одновременно (рисунок 5).



а)



б)

Рис. 6. Крепление кабелей к несущим конструкциям: а) стандартные металлические опоры и крепежные хомуты (пластик или металл); б) специальные изолирующие опоры и крепежные хомуты (ремни) из кевлара

На рисунке 5 показан морской (submarine) HVDC-кабель с жилой Milliken, который своей конструкцией противоречит как первому правилу (не надо применять Milliken для HVDC), так и второму правилу (не надо применять Milliken для морских кабелей). Скорее всего, кабель появился в силу производственных ограничений, которые имелись у конкретного завода.

СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ КАБЕЛЕЙ

Большинство образцов кабелей, представленных участниками СИГРЭ-2026, можно отнести к классам напряжения 400–500 кВ, переменного или постоянного тока, с упором на подводные HVDC-кабели. Это создавало впечатление, что в сетях 6–220 кВ проблемы кабельной отрасли уже решены и более не заслуживают внимания. Однако, к счастью, все же были и те стенды, которые сфокусировались на кабельных сетях переменного тока классов 6–220 кВ, которые традиционно интересны наиболее широкой аудитории. Среди этих стендов следует отметить два совершенно различных подхода к креплению кабелей при их прокладке по конструкциям (в тоннелях и проч.) — они отражены на рисунке 6.

На рисунке 6а показаны известные обычные несущие металлические конструкции, которые выполнены из стали и оснащены горизонтальными опорными площадками (или консолями) для укладки на них и крепления кабелей. При этом имеются три типа хомутов:

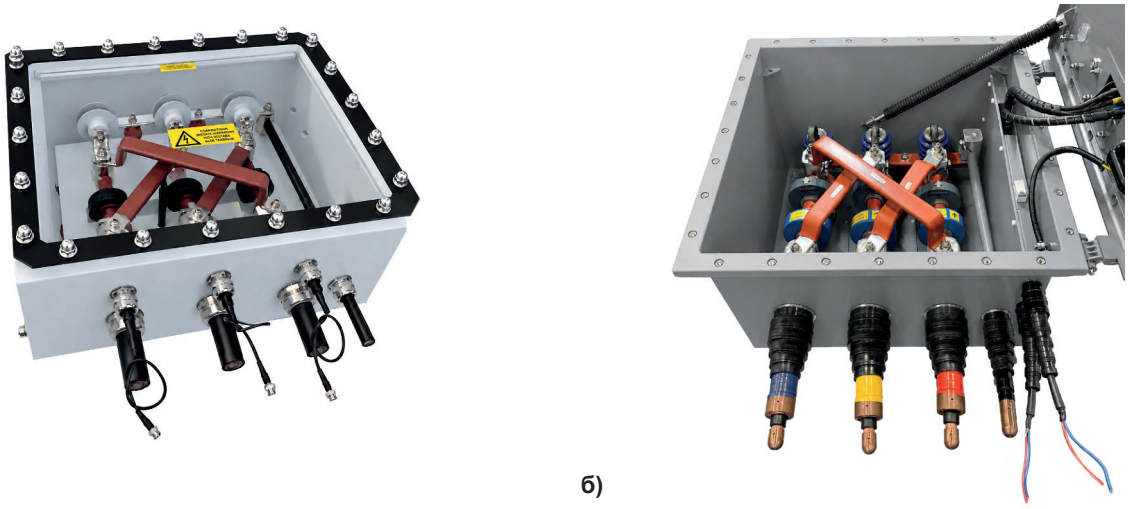
– полиамидные (в том числе усиленные стальной лентой);
– металлические для жесткого крепления;
– металлические для гибкого крепления, разрешающие движение кабеля, что может быть нужно при изменении длины кабеля вследствие колебаний его температуры.

Рисунок 6б кажется очень похожим на рисунок 6а, но на самом деле представляет собой иной подход к креплению кабелей:

– несущие опоры и площадки выполнены изолирующими;
– хомуты выполняются из кевларовых ремней (не из полиамида или стали).

Разработчики этого подхода ссылаются на опыт эксплуатации, согласно которому при КЗ на кабелях, проложенных по обычным металлоконструкциям, токи КЗ зачастую выходят изнутри кабеля наружу и через электрическую дугу попадают на металл несущих конструкций, попутно прожигая крепления, удерживающие кабель. В свою очередь, это приводит к разрушению креплений и даже падению кабеля, усложняя и удорожая ремонт КЛ. Чтобы снизить риск указанных последствий КЗ, предлагается в заводских условиях покрывать несущие металлоконструкции толстым слоем специализированного полимера, который является не только хорошим диэлектриком, но и стоек к возгоранию. Именно поэтому на рисунке 6б несущие опоры, хотя изнутри являются металлическими, снаружи покрыты диэлектриком ярко-рыжего цвета — ток КЗ не сможет

МОДУЛЬ



а) б)

Рис. 7. Умные коробки транспозиции экранов: а) с контрольными кабелями; б) с контрольными кабелями и питанием 220 В

выйти из кабеля на такие конструкции и, следовательно, не возникает риска перегорания кабельных хомутов. Что касается кевларовых ремней (вместо металлических и др.), то скорее всего это позволяет дополнительно изолировать кабели КЛ от несущих конструкций.

УМНЫЕ КОРОБКИ ТРАНСПОЗИЦИИ

Еще одна группа стендов, связанных с традиционными линиями переменного тока классов 6–220 кВ, относится к коробкам для транспозиции экранов кабелей. Дело в том, что, очевидно, наметилась тенденция пытаться оснастить такие коробки системами для мониторинга как самих коробок, так и КЛ, на которой они установлены.

Параметры, которые производители коробок транспозиции, опираясь на свой опыт, считают полезными и возможными для мониторинга, перечислены ниже:

– наведенные напряжения на экранах кабелей;
– наведенные токи в экранах кабелей;
– наличие воды/влаги в коробке;
– состояние крышки коробки (открыта/закрыта);
– состояние ОПН, установленных в коробке;
– уровень частичных разрядов в муфтах КЛ.

Чтобы контролировать указанные параметры (или хотя бы часть их них), в коробке следует предусмотреть измерительные трансформаторы напряжения и тока, различные датчики, а также системы связи между коробкой и концами КЛ. Перечисленное оборудование удорожает и усложняет конструкцию, и, например, из рисунка 7 видно, что на наружной поверхности теперь имеются не только силовые провода для подключения коробки к трем муфтам КЛ и контуру заземления, но также линии связи и низковольтные провода для питания от сети 220 В.

Чтобы указанное оборудование могло полноценно функционировать, необходима мощность до 100 Вт на каждую коробку, и возникает вопрос — откуда брать это питание? Оказалось, что производители коробок предлагают использовать низковольтный кабель 220 В, который проложить или вдоль КЛ до ее ближайшего конца (до РУ станции или подстанции), или подключить к локальной сети 220 В, расположенной поблизости от узла транспозиции. Такое предложение показывает, что разработчики коробок пока не до конца осознают проблемы электромагнитной совместимости.

Например, хорошо известно, что совместная прокладка кабелей низкого и высокого напряжения опасна теми наводками, которые возникают на кабеле низкого напряжения при коммутациях или КЗ в сети высокого напряжения. В случае же питания от локальной сети 220 В, имеются риски заноса высокого потенциала КЛ (при КЗ на КЛ) из коробки в сеть низкого напряжения, и необходимость применять разделительные трансформаторы и проводить прочие достаточно сложные защитные мероприятия. Таким образом, следует признать, что интересные идеи создания «умной» коробки транспозиции пока еще не смогут найти широкого применения по причине отсутствия безопасного «умного» решения по питанию коробок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Даже если говорить только о силовых кабелях, сессия СИГРЭ — это интереснейшее событие, в разы более масштабное, чем те отдельные темы, которые удалось подсветить в этом кратком обзорном материале. Например, в обзор не вошли такие важные вопросы как постепенно возрастающее применение кабелей с изоляцией на основе полипропилена (HVAC и HVDC), который в отличие от сшитого полиэтилена подлежит переработке. Также интересны темы использования DC-кабелей не только на высокое, но и на среднее напряжение, что находит применение в сетях возобновляемых источников энергии и дата-центров. Отдельно следует отметить прогресс в деле мониторинга КЛ (путем измерения их температуры, вибрации и других параметров), а также в вопросах моделирования КЛ и расчета их длительно допустимого тока и перегрузочной способности.