



Некоммерческое партнерство «Российский национальный комитет Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения» (РНК СИГРЭ)

109074, Россия, г. Москва, Китайгородский проезд, дом 7, стр.3. ОГРН 1037704033817.  
ИНН 7704266666 / КПП 770501001. Тел.: +7 (495) 627-85-70. E-mail: [cigre@cigre.ru](mailto:cigre@cigre.ru)

## ОТЧЕТ

об участии в 45-й Сессии CIGRE и работе Исследовательского Комитета  
**B1 «Изолированные кабели» CIGRE,**  
25-29 августа 2014 года, Париж (Франция)



Отчет подготовил:

Овсиенко Владимир Леонидович,

к.т.н., член CIGRE с 2009 г., наблюдательный член Study Committee CIGRE B1 “Insulated Cables” с 2010 г., заведующий лабораторией отделения кабелей и проводов энергетического назначения ОАО «ВНИИКП» (Москва)



Контактные данные:

E-mail: [vovsienko@vniikp.ru](mailto:vovsienko@vniikp.ru)

Тел. +7 (495) 918-14-76

Дата отчета:

07.10.2014

Москва,  
2014 год

## Оглавление

1. Дискуссионная встреча исследовательского комитета В1	3
2. Обзор докладов по предпочтительной теме 1 «Новые или модернизированные подземные и подводные кабельные системы постоянного и переменного тока»	6
3. Обзор докладов по предпочтительной теме 2 «Наиболее эффективное использование существующих кабельных систем»	16
4. Обзор докладов по предпочтительной теме 3 «Изолированные кабели в электрических сетях будущего»	24
5. Материалы рабочих групп, рассмотренные на Сессии	31
6. Обзор материалов Технической выставки «CIGRE 2014» по тематическому направлению В1	32
7. Заключение	33

## 1. Дискуссионная встреча исследовательского комитета В1

На дискуссионную встречу SC B1, состоявшуюся 27 августа 2014 г. было представлено 33 доклада. Обсуждались следующие основные темы:

**Предпочтительная тема 1** «Новые или модернизированные подземные и подводные кабельные системы постоянного и переменного тока», в том числе по направлениям:

- проектирование, технология монтажа, эксплуатация;
- защита окружающей среды, ослабление воздействия на нее;
- опыт внедрения, лицензирования, получения разрешений.

По данной теме было представлено 14 докладов, сформулировано 5 вопросов:

1) есть ли необходимость разработки в будущем специфических дополнительных методов испытаний и формулирование дополнительных требований, кроме существующих в настоящее время требований CIGRE и МЭК?

2) каково влияние развития ветроэнергетики на кабельные системы, что является важным в проектировании, в эксплуатации в характеристиках кабелей, используемых при создании ветроферм?

3) проблемы, возникающие при процедурах получения различного рода разрешений и согласований при проектировании и строительстве КЛ, обеспечение экологических требований;

4) сооружение кабельных линий в городских условиях, существующие положение дел, трудности, новые методы и приемы прокладки КЛ;

5) повышение качества и надежности соединительных и концевых муфт, повышение квалификации участников монтажных работ, режимы и методы испытаний линий после прокладки.

**Предпочтительная тема 2** «Наиболее эффективное использование существующих кабельных систем», в том числе по направлениям:

- диагностика и оценка текущего состояния кабельных систем;
- тенденции в вопросах мониторинга кабелей и арматуры;
- совершенствование методик и связанный с этим опыт;
- тенденции в стратегии технического обслуживания.

По второй теме было представлено 11 докладов, сформулировано 5 вопросов:

1) каковы тенденции и новые методы по определению мест повреждения подземных и подводных кабелей?

2) новые подходы и новые методики по измерению частичных разрядов – инструмента, используемого как для анализа качества кабельной линии

непосредственно после прокладки, так и для мониторинга текущего состояния во время эксплуатации;

3) температурный мониторинг, направления его развития, пути совершенствования;

4) испытания после прокладки: какие новые и дополнительные методы используются или находятся в стадии разработки?

5) вопросы эксплуатации, обслуживания, замены кабельных линий: какие методы и какая техническая политика здесь используется; каковы пути улучшения на ближайшее будущее?

**Предпочтительная тема 3** «Изолированные кабели в электрических сетях будущего», в том числе по направлениям:

- наивысшие уровни напряжения переменного и постоянного тока для кабелей;
- новые функциональные возможности, ожидаемые от кабельных систем;
- технические проблемы длинных кабелей, интеграция кабелей в электрические сети;
- инновационные типы кабелей.

По теме представлено 8 статей, на обсуждение вынесены следующие вопросы:

1) кабели на постоянное напряжение с экструдированной изоляцией: каких уровней напряжения для этих изделий следует ожидать в будущем?

2) развитие кабельных систем на основе высокотемпературной проводимости: что может быть движущей силой для внедрения этих систем; что является необходимым и достаточным, чтобы эти системы стали коммерчески жизнеспособными в больших масштабах?

3) применение новых материалов для высоковольтных кабелей: через сколько времени можно ожидать, что сшитый полиэтилен будет потеснен; можно ли использовать существующие стандарты для оценки качества этих материалов?

4) основные проблемы в области разработки и испытания подводных кабельных систем для больших глубин, плавучих платформ и линий большой длины;

5) разделы кабельной техники, где должны быть обновлены существующие стандарты.

В прозвучавших выступлениях и обсуждении подчеркивалась необходимость разработки дополнительных (помимо существующих на настоящее время стандартных) методик испытаний. Это, в первую очередь, относится к кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена, работающим в схемах с преобразователями типа VSC-конвертеров; к кабелям с большим (2500 – 3000

мм<sup>2</sup>) сечением жил или с жилами, где применяется эмалированные проводники; к офшорным кабелям, испытывающим динамическую нагрузку.

Важным было признано направление, связанное с испытаниями после прокладки КЛ. Подчеркивалось, что данные испытания – это проверка, в первую очередь, качества монтажа КЛ, поскольку все ее компоненты уже протестированы на заводе изготовителя.

Выступления докладчиков также показали, что продолжает активно развиваться температурный мониторинг, особенно применение его в подводных кабельных линиях.

Многие подчеркивали, что особое внимание необходимо уделить дополнительному контролю качества арматуры. По информации испытательного центра КЕМА (Нидерланды), наиболее часто испытания не выдерживает наружная защита муфт, предназначенных для подземной прокладки.

При рассмотрении вопросов, касающихся расчетов режимов работы кабельных линий, отмечалась необходимость разработки соответствующих методик для кабелей с броней, для кабелей, предназначенных для прокладки на больших глубинах, а также для офшорных подводных кабелей, поскольку график их нагрузки существенно колеблется по времени.

При обсуждении докладов отмечена необходимость обновления ТБ 358-2008 (управление жизненным циклом существующих подземных кабельных линий переменного тока). Необходима выработка современной методологии анализа экономических технических и стратегических критериев с целью получения рекомендаций по поводу замены кабеля или продление срока эксплуатации КЛ.

Интерес присутствующих также вызвало сообщение представителя компании PRYSMIAN ЕС (Италия), доложившего результаты применения изоляционного термопластичного материала для кабелей среднего и высокого напряжения.

## 2. Обзор докладов по предпочтительной теме 1 «Новые или модернизированные подземные и подводные кабельные системы постоянного и переменного тока»

Доклад В1-101 «Применение соединительных Т-образных муфт в высоковольтных подземных кабельных установках», авторы F.W. Seybold, L.A. Medaglia, I.M. Ruiz (Аргентина).

Т-образные муфты получили распространение при расширении передающих и распределительных сетей. В ряде случаев их применение позволяет сократить необходимое число подстанций. Кожух муфты выполнен из нержавеющей стали, пространство внутри заполнено элегазом. В докладе приведены примеры применения данных устройств в цепях 132 и 220 кВ. Также данное оборудование было задействовано для того, чтобы собрать цепь для испытаний КЛ сверхнизкой частотой (рис.1).

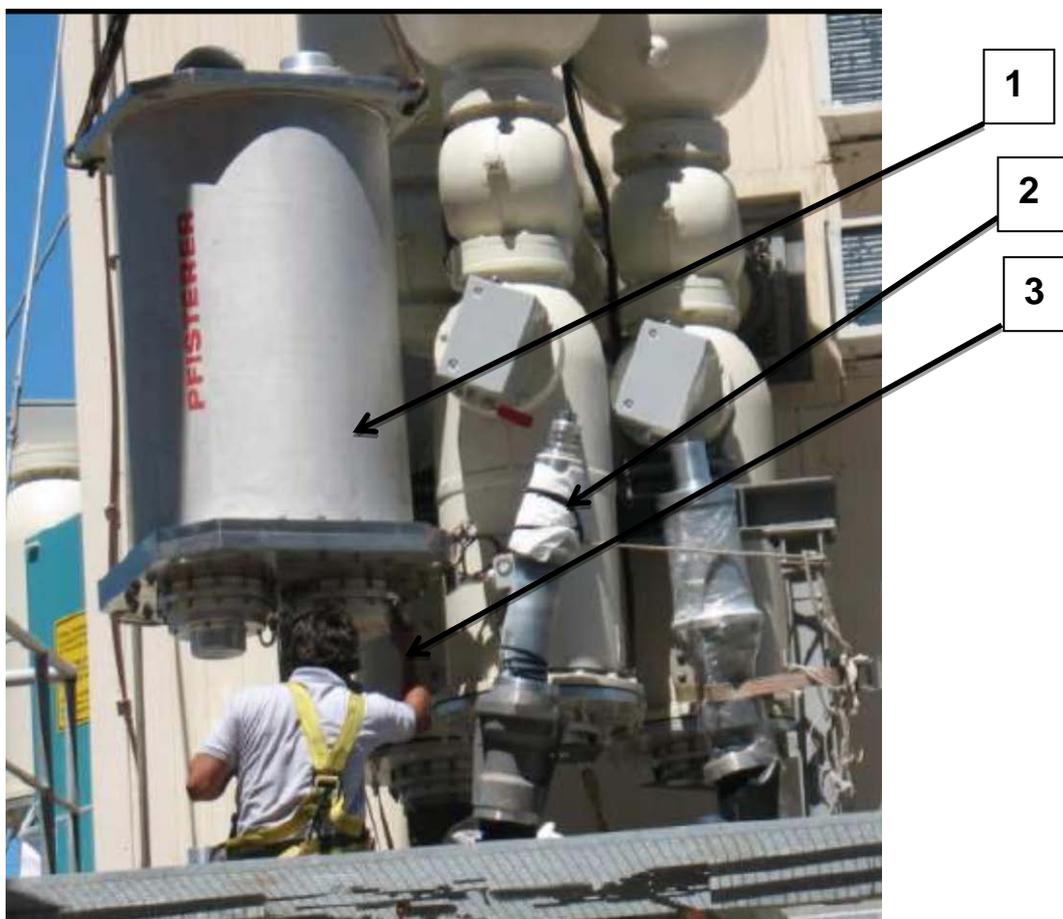


Рис. 1. Пример использования Т-образной муфты на подстанции Костанера (Аргентина)

*Пояснения к рисунку 1:*

*1 – внешний вид Т-образной муфты;*

*2 – фаза кабеля, подготовленная для монтажа;*

*3 – смонтированная фаза кабеля.*

**Доклад В1-102** «Испытания кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 330 кВ по специальной программе», авторы – К. TANG, D.PATON, G.BUCEA (Австралия), S. MASHIO, Y. MURAMATSU (Япония).

Авторы доклада справедливо отмечают, что стандартные типовые испытания при максимальной температуре 100°C не отражают реальных условий эксплуатации, когда кабель кратковременно может перегреваться до температуры 105°C. Исходя из этого, перед поставкой кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 330 кВ между подстанциями Holroyd и Rookwood Road (Сидней, Австралия) была разработана специальная программа испытаний. Она состояла из циклического нагрева образцов (28 циклов) до максимальной температуры 105-108°C под напряжением 420 кВ. Также в программу входило измерение частичных разрядов, испытания импульсным напряжением 1300 кВ, проверка работоспособности распределенных оптоволоконных датчиков температуры, контроль давления тела соединительной муфты на изоляцию кабеля, определение коэффициента трения между фазой кабеля и оболочкой, испытания токами короткого замыкания (50 А, 1 с). Испытания закончились с положительным результатом, что говорит о высоком качестве поставленного оборудования.

**Доклад В1-103** «Расширенная программа типовых испытания для обеспечения надежности новых кабельных систем», авторы V. BEGHIN, S. SZCZEPANSKI, J. BECKER (Бельгия).

Необходимость появления данной программы испытаний была вызвана тем, что производитель предложил кабель с уменьшенной толщиной изоляции. Поэтому для подтверждения надежности кабельной системы на напряжение 150 кВ принято решение увеличить число испытательных циклов нагрева-охлаждения со стандартных 20-ти до 100. Кроме этого, с целью проверки соединительных муфт в программу испытаний входило трехкратное воздействие токами КЗ с последующим обследованием изоляционных материалов методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и обследование мест соединения жил. Испытания закончились с положительным результатом.

**Доклад В1-104** «Вновь проложенные подземные кабельные линии переменного тока в Бразилии», авторы – С.D. PEIXOTO, J.C.R. LOPES, N.H.G.R. DE LOUREDO, E. KARABOLAD FILHO (Бразилия).

В докладе представлены данные по развитию кабельных сетей Бразилии за последние 10 лет. Анализ охватывает линии на напряжение свыше 69 кВ. Общая длина КЛ этого класса составляет 558 км. Максимальный освоенный класс напряжений – 345 кВ (соответствующая длина линий – 54,5 км), максимальное количество проложенных линий приходится на класс напряжений 138 кВ.

Подавляющее большинство используемых кабелей имеет изоляцию из сшитого полиэтилена (небольшое количество 0,6 % и 0,44 % составляют кабели с резиновой и маслonaполненной изоляцией соответственно). В материале жилы преобладает алюминий (64 %).

Авторами отмечается, что в зависимости от региона существенным образом различаются статьи затрат на создание КЛ. Стоимость материалов меняется в пределах 35 – 65 % от общих затрат, стоимость строительных работ 25 – 45 %, затраты на монтаж – 10 – 25 %.

**Доклад В1-105** «Первые проекты по интеграции энергии от ветроферм в высоковольтные сети переменного и постоянного тока в Северном море в Германии: опыт, проблемы, перспективы», авторы – D. Zhang, V. Werle, J. Jung (Германия).

Подключение офшорных ветроферм к электрическим сетям Германии началось в 2006 г. К 2020 году эти мощности планируется довести до 6,5 ГВт.

Обычная схема подключения ветрофермы включает в себя кабель переменного тока подводной прокладки, офшорную подстанцию, конвертирующую морскую станцию, кабель постоянного тока подводной прокладки, кабель постоянного тока подземной прокладки, конвертирующую наземную станцию. На январь 2014 уже осуществлено 11 присоединений. Общая протяженность кабеля составила 2 919 км.

В проектах использован кабель переменного тока на напряжения 110 - 155 кВ и постоянного тока на напряжения 150 – 320 кВ.

Авторы делают вывод, что в настоящее время уровень напряжения 320 кВ является для Германии предельным из-за отсутствия какого-либо опыта эксплуатации и значительных технических трудностей, связанных с необходимостью монтажа строительных длин, превышающих 10 км. При монтаже зафиксированы случаи повреждения кабеля из-за неустойчивости платформы (перемещения составляли  $\pm 1$  м). Большой проблемой, по мнению авторов, является отсутствие на настоящее время международных стандартов, которые бы охватывали каждый компонент системы, а также все процедуры от проектирования до эксплуатации.

**Доклад В1-106** «Городские кабели для передачи энергии на напряжение 220 кВ: концепция будущего», авторы – K. Sharma, P. Kumar; M.S. Rao, V. G. Sonar, T. V. Talande, A. K. Phadnis (Индия).

В докладе обсуждаются проблемы, связанные с постоянным увеличением объема потребляемой электроэнергии на душу населения в городах. В связи с этим растет плотность городских кабельных систем, и возрастают связанные с этим трудности.

В докладе на примере кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена с сечением жилы 1 200 мм<sup>2</sup> (медь) показаны этапы создания кабельных линии на

напряжение 220 кВ в крупных городах Индии. Поставка осуществлялась на барабанах по 500 м из-за ограничений по условиям транспортировки. Открытые земляные работы проводились в течение 45 дней, большой объем работ выполнялся вручную из-за большой плотности подземных городских коммуникаций. Две цепи кабеля прокладывались на расстоянии 700 мм на глубине 1500 мм. Кабель закрывался железобетонными плитами и вдоль трассы закладывалась специальная сигнальная лента. Засыпка осуществлялась смесью песка – 86 %, золы – 13 %, цемента – 1 %. Для соединения с воздушной ЛЭП были использованы специальные опоры, на которых размещались концевых муфты наружной установки.

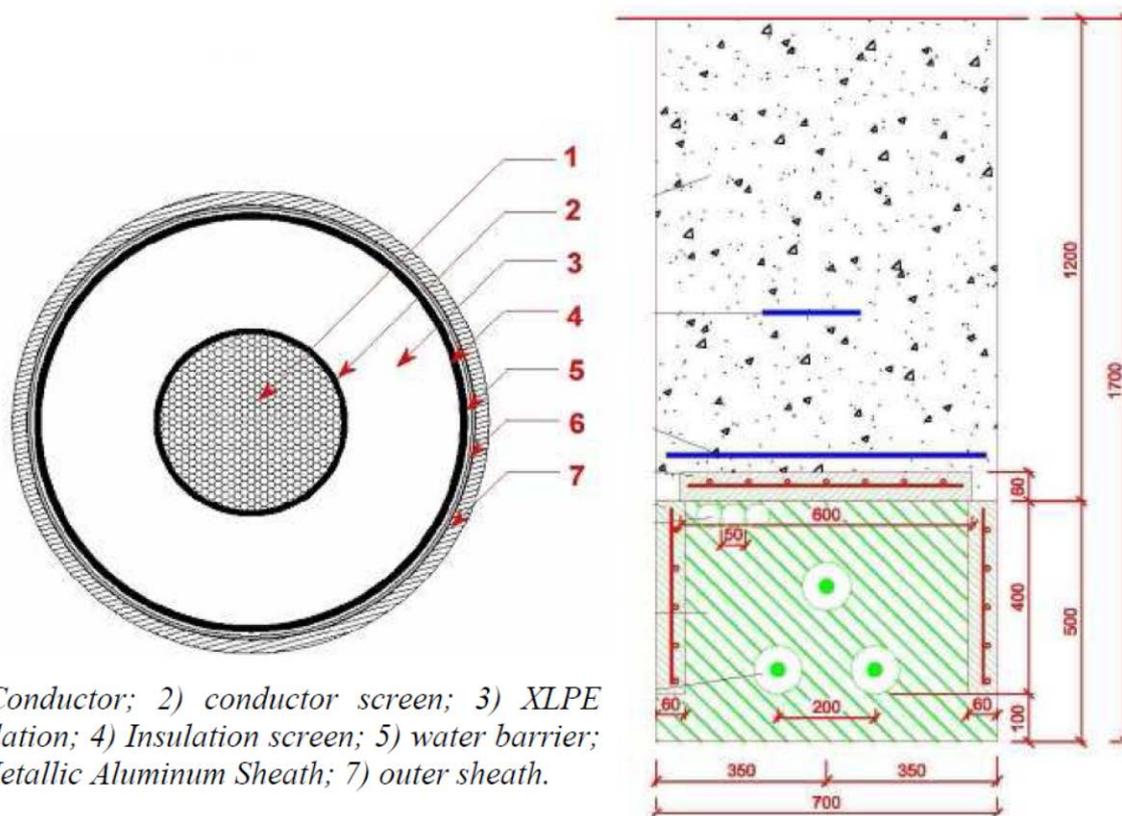
**Доклад В1-107** «Уроки, извлеченные из процедуры получения разрешений и согласования проекта подземной кабельной линии переменного напряжения 150 кВ «Южный Кальяри – Румьянка» (Италия)», авторы – М. Forteleoni, V.P. Licciardi, M. Rebolini (Италия).

Авторы отмечают стабильный годовой рост подземных кабельных линий в Италии в среднем на 11 % в год в течение последних четырех лет. Ожидается, что эта тенденция будет сохраняться. Планируются проекты в городской черте Милана, Турина, Рима и Неаполя.

По итальянскому законодательству кабельные линии длиной более 40 км должны проходить специальную экспертизу, в том числе по оценке влияния на окружающую среду. В докладе авторы описывают процедуру технических и экологических согласований на примере проекта линии 150 кВ «Южный Кальяри – Румьянка». Основная трудность заключалась в том, что первоначально данный проект предполагал создание воздушной линии электропередач.

Большое время заняла оценка альтернативных вариантов прохождения трассы с точки зрения стоимости и процедура их согласования. Также потребовался дополнительный анализ проекта с точки зрения устойчивости к наводнениям, поскольку в данном районе в 2008 году на реке Сан-Джироламо наблюдался большой подъем уровня воды. Также необходимо было учитывать воздействие на окружающую среду электромагнитных полей. По итальянским нормам максимальная величина напряженности электрического поля в зоне, где могут находиться люди более 4-х часов, составляет 5 кВ/м, магнитного – 3 мкТл.

Окончательно для проекта был выбран кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена с жилой сечением 1 600 мм<sup>2</sup>. Конструкция кабеля и схема прокладки представлена на рис. 2. Кабель проложен симметричным треугольником для уменьшения электромагнитного поля вокруг линии.



1) Conductor; 2) conductor screen; 3) XLPE insulation; 4) Insulation screen; 5) water barrier; 6) Metallic Aluminum Sheath; 7) outer sheath.

Рис. 2. Схема прокладки и конструкция кабеля

Пояснения к рисунку 2:

- 1 – жила;
- 2 – экран по жиле;
- 3 – изоляция;
- 4 – экран по изоляции;
- 5 – водоблокирующий барьер;
- 6 – алюминиевая оболочка;
- 7 – наружная защитная оболочка.

**Доклад В1-108** «Оптимизация токовой нагрузки для кабелей, передающих энергию от офшорных ветроферм», авторы – J.A. PILGRIM, S. CATMULL, R. SHIPPENDALE, P.L. LEWIN, P. STRATFORD, R. TYREMAN (Великобритания).

Авторами отмечается, что кабельные линии составляют значительную часть стоимости ветроферм. В связи с этим чрезвычайно актуальным является определение оптимальной токовой нагрузки, которую способна передать кабельная линия с учетом особенностей работы ветрофермы.

В докладе представлены результаты экспериментов и расчетов, выполненные для этих целей на примере типичного трехфазного кабеля на напряжение 132 кВ с сечением жилы 630 мм<sup>2</sup>. Расчеты нагрузочной способности, проведенные методом конечных элементов с использованием экспериментальных данных, дают результаты на 10-12 % выше, чем полученные по стандартной методике МЭК 60287.

Анализ данных температурного мониторинга за 4 года эксплуатации ветрофермы (рис. 3) показывает, что ветровая нагрузка непостоянна, и кабель не достигает максимальных температур, поскольку постоянная времени системы - более 300 часов. В будущем при накоплении опыта эксплуатации этот факт также должен учитываться при определении нагрузочной способности КЛ.

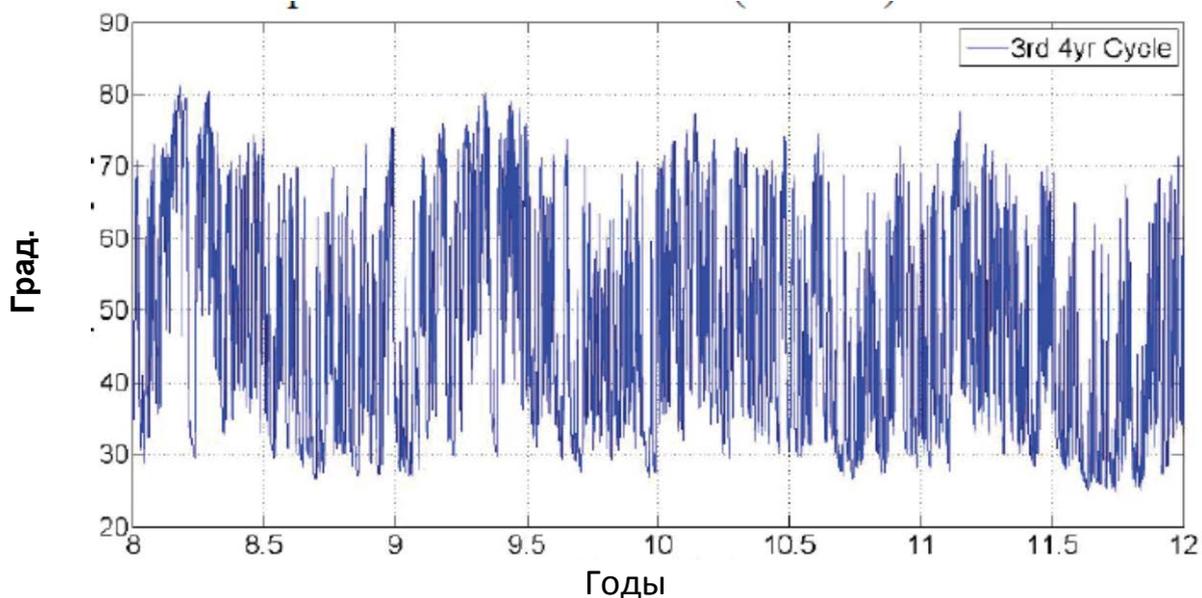


Рис. 3. Пример изменения температуры кабеля, передающего электроэнергию от ветрогенератора

**Доклад В1-109** «Переходная муфта на напряжение 138 кВ между маслонаполненным кабелем высокого давления и кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена», авторы – А. МАКОВОЗ, J. RUTH (США).

Представленное в докладе устройство разработано для подстанции ConEdison's Newtown в Нью-Йорке, США. Муфта соединяет маслонаполненный кабель в трубе под давлением и кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена. Маслонаполненный кабель имеет медную жилу сечением 1000 мм<sup>2</sup>, пропитанную бумажную изоляцию толщиной 12,45 мм. Полиэтиленовый кабель выполнен с медной жилой сечением 760 мм<sup>2</sup> и изоляцией толщиной 18,4 мм. Муфта в сборе представлена на рис. 4.



Рис. 4 Переходная муфта в сборе

На рис. 5 представлено схематическое расположение элементов муфты.

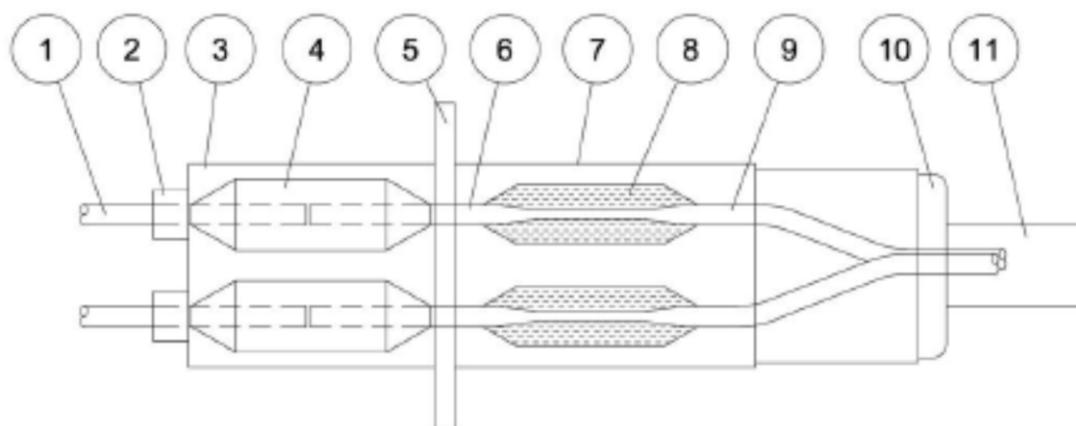


Рис. 5 Схема расположения элементов переходной муфты.

*Пояснения к рисунку 5:*

- 1 - кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена;*
- 2 – наружное уплотняющее устройство;*
- 3 - стальной кожух со стороны полиэтиленового кабеля;*
- 4 –предварительно отлитое тело муфты;*
- 5 – центральная стопорная пластина;*
- 6 – соединительная гильза Voltalit;*
- 7 – телескопический стальной кожух;*
- 8 – тело муфты из намотанных бумажных лент;*
- 9 - кабель с бумажной изоляцией;*
- 10 – переходник;*
- 11- стальная труба.*

Муфта прошла испытания переменным, постоянным и импульсным напряжением и испытания циклами нагрева-охлаждения под напряжением 160 кВ, испытания наружной защиты и измерение частичных разрядов.

Монтаж муфты занимает 6 суток.

**Доклад В1-110** «Практическое применение  $\pm 250$  кВ-ного кабеля постоянного тока с изоляцией из сшитого полиэтилена в высоковольтной линии Хоккайдо-Хонсю», авторы – А. WATANABE, Y. ITOU, H. SASAKI, S. KATAKAI, M. WATANABE, Y. MURATA (Япония).

В докладе отмечается, что на момент ввода линии в эксплуатацию в декабре 2012 года это был максимальный уровень постоянного напряжения для кабелей с экструдированной изоляцией. Другой особенностью линии являлось то, что в режиме реверса мощности происходило изменение полярности постоянного напряжения на кабеле, что могло привести к повреждению изоляции из-за накапливавшегося объемного заряда.

Для преодоления этих трудностей была разработана специальная изоляционная сшиваемая композиция на основе полиэтилена. Длина морского участка КЛ составляла 42 км (сечение жилы 600 мм<sup>2</sup>), наземного – 1,3 км (сечение жилы 900 мм<sup>2</sup>). Внешний вид кабеля представлен на рис. 6.

Кабель имеет свинцовую оболочку, двойную стальную броню, снабжен распределенным датчиком температуры и датчиком внешних повреждений. Перед применением данного кабеля был выполнен комплекс типовых и преквалификационных испытаний.

В состав испытательной сборки помимо кабеля входила арматура (концевые муфты, соединительная муфта заводского исполнения, переходная муфта от подводного к подземному кабелю). Следует отметить, что первая стадия испытания длились 134 суток, что является отступлением от международных рекомендаций. Однако, после ее успешного завершения и принятия положительного решения о применении кабеля, были выполнены годовые (360 суток) испытания в полном соответствии с требованиями ТВ 219 и ТВ 496 CIGRE.



Рис. 6. Внешний вид подводного кабеля DC  $\pm 250$  кВ

**Доклад В1-111** «Уровень импульсных испытательных напряжений в кабельных системах постоянного тока с экструдированной изоляцией», авторы – J. Lundquist (Швеция), С. Engelbrecht (Нидерланды), Е. Thunberg, Н. Jansson, V. Dubickas, Т. Worzyk (Швеция).

В данном докладе анализируется уровень возможных импульсных воздействий на две новые проектируемые линии постоянного тока: линия, соединяющая южную и западную Швецию, и линия между Швецией и Литвой.

Для расчетов параметров грозового импульса перенапряжений, который воздействует на кабель, была разработана математическая модель. Расчетная схема включала в себя первые семь пролетов воздушной линии, кабель и защитные разрядники. Учитывались статистические данные грозовой активности, геометрия опор, характеристики системы заземления. Полученные результаты показали, что величина перенапряжения на кабельной линии существенным образом зависит от величины тока молнии, места удара, геометрических характеристик элементов схемы замещения. Эти данные подтверждают положения технической брошюры CIGRE ТВ 496, согласно которым уровень импульсных испытательных напряжений для кабелей на постоянное напряжение с экструдированной изоляцией в явном виде не устанавли-

вается. Амплитуда испытательного импульса должна выбираться, исходя из характеристик конкретной системы.

**Доклад В1-112** «Влияние процедур по обеспечению и контролю качества на успешный ввод в эксплуатацию длинных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 380 кВ», авторы – S. MEIJER, F.H. DE WILD, G.R. KUIK, J. TER HAAR, R. ROSS (Нидерланды), V. WASCHK (Германия).

За недавнее время в Голландии проложено порядка 130 км кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 380 кВ. На линиях установлено 132 соединительные и 24 концевые муфты.

Данные кабели использовались в качестве важных связующих элементов в многокольцевой структуре голландских электрических сетей, поэтому к ним предъявлялись повышенные требования по надежности. Первоначально все элементы системы прошли весь комплекс преквалификационных, типовых и приемо-сдаточных испытаний в соответствии с требованиями стандарта МЭК 62067. На элементах арматуры измерялись частичные разряды, проводились испытания переменным напряжением и грозowymi импульсами амплитудой 1425 кВ. В случае электрических пробоев при испытаниях проводилось углубленное исследование образцов с выявлением причине отказа и принятием мер по улучшению качества.

После прокладки каждая фаза линии была успешно испытана напряжением 374 кВ с измерением уровня частичных разрядов.

**Доклад В1-113** «Новые инновационные методы монтажа кабеля постоянного тока на напряжение 500 кВ, используемого в проекте Skagerrak-4 между Данией и Норвегией», авторы – В. KLEBO-ESPE, L. BJERKE (Норвегия), U. S. GUDMUNDSDOTTIR, T. KVARTS (Дания).

Решение о модернизации кабельной линии постоянного тока между Данией и Норвегией и использовании для этого кабеля с пропитанной (MI) изоляцией принято в 2010 году.

Проект состоял из 3 частей:

кабельная трасса длиной 93 км по суше по территории Дании с пересечением фьорда (1000 м);

морской кабель длиной 138 км и глубиной прокладки до 523 м, с выходом на крутые скалистые склоны;



Рис. 7. Прокладка кабеля в Дании с использованием специального трейлера

12 км трассы по суше в скальных грунтах.

Для снижения количества арматуры на первом участке использовались отрезки повышенной длины (по 1400 и даже по 1600 м). Поставка таких длин



Рис. 8 Специальное устройство для создания кабельной траншеи на глубинах 10 – 30 м

осуществлялась на барабанах диаметром 4,5 м и длиной 7,75 м. Сечение жилы кабеля составляло 1600 мм<sup>2</sup> (медь), масса кабеля - 35 кг/м. Для транспортировки кабеля потребовался специальный 12-ти осный трейлер грузоподъемностью 120 тонн (рис. 7).

Предыдущий опыт эксплуатации показал, что основной процент внешних повреждений кабелей приходился на глубины от 20 до 40 м на расстояниях 20 – 40 км от датского побережья. Для нового проекта был использован специальный подводный плуг (рис. 8), который позволил проложить траншею по дну на глубинах 10-30 м на расстояниях 9-35 км от берега

**Доклад В1-114** «Гибкий подход в использовании естественно- или принудительно вентилируемых тоннелей для сверхвысоковольтных кабелей при прохождении через городскую среду», авторы – S. Al Jallaf, H. Busamra, K. Al Roken, J. George (ОАЭ), L. Popiel, O. Moreau, O. J. Jarry (Франция).

В докладе представлен проект первого на Среднем Востоке кабеля на напряжение 400 кВ в эмирате Дубай.

Для его прокладки в городской черте был спроектирован специальный вентилируемый тоннель с учетом особенностей климата данного региона. Система вентиляции должна была обеспечивать температуру не выше 62°С. Длина тоннеля составляла 4 км в длину, размеры – 2,65 м на 2,50 м. Тоннель разделен на 2 части пожарной перегородкой. Кабельная линия состояла из двух цепей с жилой 2500 мм<sup>2</sup>



Рис. 9. Расположение фаз двухцепной КЛ 400 кВ в Дубае

(медь). Фазы располагались вертикально вдоль противоположных стен (рис.9).

Для естественной вентиляции было предусмотрено сооружение 8-ми вентиляционных шахт. Принудительная вентиляция осуществлялась посредством двух нагнетающих вентиляторов, расположенных в средней шахте. Контроль температуры кабеля и воздуха в тоннеле осуществлялся с помощью оптоволоконных датчиков температуры.

Проведенные мероприятия позволили передавать по двум кабельным цепям мощность 914 МВА с естественной вентиляцией и 3000 МВА с принудительной вентиляцией в летний период, когда окружающая температура могла достигать 50°C.

### **3. Обзор докладов по предпочтительной теме 2 «Наиболее эффективное использование существующих кабельных систем»**

**Доклад В1-201** «Более глубокое понимание проблемы определения мест повреждений в длинных подводных силовых линиях», авторы – М. BAWART (Австрия), М. MARZINOTTO, G. MAZZANTI (Италия).

По статистике подавляющее большинство повреждений подводных кабельных линий связано с деятельностью человека и только незначительная часть – со стихийными бедствиями. Данные Международного комитета по защите кабельных линий (ICPC, [www.iscpc.org](http://www.iscpc.org)) говорят, что причиной порядка 80 % зафиксированных повреждений были воздействия на кабели якорей, рыболовных снастей, устройств по углублению дна. Остальные 20 % повреждений приходится на подводные землетрясения, оползни, течения, воздействия подводной фауны.

В докладе обобщен опыт по данной тематике, накопленный в крупнейшей итальянской сетевой энергетической компании TERNA. При повреждении подводного кабеля персонал фирмы действует по следующей процедуре.

1. Определение типа повреждения (низкоомное, высокоомное, повреждение оболочки и т.д.).
2. Определение эффективного способа обнаружения места повреждения (рефлектометрия, мост Мюррея, дожигание и т.д.).
3. Определение точки повреждения, маркировка.
4. Подъем кабеля, ремонт, испытания.
5. Восстановление линии.

Авторы особо отмечают, что при проведении ремонтных работ на длинных кабельных линиях необходимы дополнительные меры по обеспечению безопасности персонала, поскольку такие линии имеют большой запас статического электричества, что связано с их большой емкостью. Так, линия

в 400 км при испытательных напряжениях в 32 кВ запасает энергию 76,8 кДж.

**Доклад В1-202** «Диагностические испытания и он-лайн мониторинг состояния кабельных систем на основе измерения частичных разрядов», авторы – В.Т. PHUNG, Z. LIU, Т. R. BLACKBURN, G. BURGESS, P. McMULLAN, H. ZHANG (Австралия).

В докладе обобщен опыт исследования частичных разрядов на распределительных 11/22 кВ и передающих 33/66/132 кВ линиях. Используемые при этом сенсоры в виде высокочастотных трансформаторов тока, устанавливаемые на концевые муфты, обладают хорошей чувствительностью до 50 пКл в частотном диапазоне 100 кГц – 50 МГц. Также для использования на длинных линиях были разработаны датчики с чувствительностью в диапазоне до 500 МГц. По опыту авторов при измерении частичных разрядов на линии основной проблемой является большой уровень шумов. Для решения этой проблемы было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее эффективно отфильтровать полезный сигнал.

**Доклад В1-203** «Философия и опыт использования систем температурного мониторинга на основе распределенных датчиков, а также будущее систем мониторинга частичных разрядов в Бельгии», авторы – В. HENNUY, P. LEEMANS, В. МАМРАЕУ, M. BURCEANU, J. VAN SLYCKEN (Бельгия).

В период 2008 – 2009 гг. в Бельгии обследованы примерно 200 старых кабельных линий среднего напряжения на предмет уровня частичных разрядов. В качестве примеров приводятся испытания КЛ на напряжение 36 кВ, на которых были зафиксированы уровни сигнала от 1000 до 8000 пКл.

Повышенный уровень ЧР свидетельствовал о дефектах в соединительных муфтах, в то время, как измерения  $\text{tg } \delta$  изоляции говорили о ее удовлетворительном качестве. После демонтажа арматуры в ней были обнаружены дефекты, служившие причинами повышенного уровня ЧР (пример на рис.10).



Рис. 10. Пример дефекта разделки кабеля на напряжение 36 кВ, послуживший причиной высокого уровня ЧР

На основании этих измерений была выработана стратегия по замене арматуры, и в данный момент этот опыт признан положительным. Сейчас ведутся работы по измерению ЧР на линиях до 380 кВ.

Также положительным признан опыт использования систем температурного мониторинга, особенно перспективно их применение в подводных кабелях.

**Доклад В1-204** «Сочетание испытаний силовых кабелей переменным напряжением с помощью резонансной установки и измерением частичных разрядов при затухающем напряжении в полевых условиях», авторы – Y. XU, W. LIU, J. XUE, H. LI, Y. LA (Китай).

Основной трудностью при полевых испытаниях кабелей, по мнению авторов, является тот факт, что используемая резонансная установка для испытания напряжением частотой 20 – 300 Гц практически не пригодна для измерения частичных разрядов, поскольку дает достаточно большие помехи. Для этих целей более подходит измерение с помощью системы OWTS (измерительная система на основе колеблющихся волн).

Проведенные испытания на кабелях среднего напряжения показали, что для линий до 5 лет эксплуатации критическим является уровень ЧР 100 пКл для кабеля и 300 пКл для арматуры. Для линий, которым более 5 лет, данный критерий установлен на уровне 500 пКл.

**Доклад В1-205** «Опыт измерения частичных разрядов на типовых испытаниях в соответствии с требованиями МЭК и испытания после прокладки кабелей с экструдированной изоляцией», авторы – A. El Faraskoury (Extra High Voltage Research Center, Egyptian Electricity Holding Company, Egypt), O. Gouda, M. Mokhtar (Faculty of Engineering, Al-Azhar University, Cairo, Egypt), M. Mehan (Faculty of Engineering, Cairo University, Egypt).

В докладе представлены результаты электрических типовых испытаний кабеля на напряжение 220 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена с



Рис.11. Типовые испытания кабеля на напряжение 220 кВ

сечением жилы 1200 мм<sup>2</sup>. В состав испытательной сборки входили 3 соединительные и две концевые муфты. Программа испытаний составлена в соответствии с требованиями стандарта МЭК 62 067.

Испытательная сборка представлена на рис. 11. При измерении ЧР их уровень составил 7,5 пКл. После проведения дегазации изоляционной жидкости концевых муфт он снизился до 2,8 пКл.

Испытания после прокладки проводились на резонансной установке 20 – 300 Гц. Характеристики данного оборудования позволяли испытывать кабельные линии на напряжение 220 кВ длиной до 16,4 км. Измерения частичных разрядов проводились только для арматуры с помощью датчиков ЧР.

**Доклад В1-206** «Опыт измерения частичных разрядов на проложенных высоковольтных кабельных системах», авторы – F. Garnacho, I. Trasmonte, R. Martin, M.A. Sánchez-Urán, J. Ortego, F. Álvarez, D. Prieto, J. Vallejo, M.A. Jiménez (Испания).

В настоящее время существует три основных принципа измерения ЧР: on-line, off-line и непрерывный мониторинг. Измерения «на линии» по мнению авторов более привлекательны, так как не требуют отключения КЛ, но, в то же время, подвержены большим помехам и обладают меньшей чувствительностью. Непрерывный мониторинг является по сути расширенным по времени on-line измерением и рекомендуется в особо ответственных случаях, чтобы избежать катастрофических последствий пробоя.

Результаты непрерывного мониторинга получены на примере КЛ на напряжение 45 кВ, проложенной в аэропорту Мадрида (Испания). Линия имеет 4 соединительные муфты. Перед вводом в строй КЛ была испытана напряжением сверхнизкой частоты, каких либо дефектов изоляционной системы выявлено не было. В качестве сенсоров ЧР использовались высокочастотные трансформаторы тока.

Через несколько дней система мониторинга зафиксировала ЧР на нескольких соединительных муфтах. По истечению 35 дней наблюдений было принято решение о ремонте одной из муфт, поскольку интенсивность (частота следования импульсов ЧР) стала увеличиваться. Хотя при этом амплитуда импульса несколько уменьшилась. После вскрытия изоляции муфты (рис. 12) подтвердилось наличие в ней дефекта. Таким образом, практика показывает, что амплитуда ЧР не всегда является показательным параметром. При принятии решения необходимо также учитывать частоту импульсов, их количество за период.



Рис. 12. Участок дефектной изоляции соединительной муфты 45 кВ

**Доклад В1-207** «Опыт компании REE (Red Eléctrica de España, Испания) по профилактическому обслуживанию высоковольтных подземных кабелей на основе мониторинга токов в экранах», авторы – R.G. FERNÁNDEZ, M.D. LÓPEZ-MENCHERO, G.D. CONEJO (Испания).

Доклад подводит итоги экспериментальным работам, начатым в 2008 году в высоковольтных кабельных сетях Барселоны. В двадцати семи точках на линиях были установлены датчики, фиксирующие величину токов в экранах кабелей.

В зависимости от способа заземления, величины тока нагрузки, геометрии системы определялись теоретические значения токов в экранах. При нормальном режиме работы величины их составляли 2 – 20 А. При аварийных ситуациях измеренные значения токов достигали 194 А. Причиной такого увеличения служили повреждения наружных оболочек кабелей. После восстановления целостности защитных оболочек значения токов в экранах возвращались к своим первоначальным значениям.

**Доклад В1-208** «Пилотный проект в Цюрихе (Швейцария) по мониторингу нагрузочной способности кабеля с использованием оптоволоконного программного обеспечения для прогноза состояния», авторы – E. CHIMI, V. HEIMBACH, J. BADER, H. LUTERNAUER (Швейцария).

В докладе обсуждается проблема, связанная с расчетом температурного режима кабельной линии на напряжение 22 кВ при быстро изменяющейся нагрузке.

Трехфазная линия была проложена треугольником встык, оптоволоконный датчик крепился снаружи кабеля. Первоначальные измерения показали, что из-за различных условий теплоотвода вдоль трассы температура в разных точках менялась от 15 до 50°C. Самые высокие значения температур были получены в месте перехода кабеля через пожарные перегородки. Для проверки точности программного обеспечения был проведен эксперимент, когда на кабельную линию была подана нагрузка 400 А. При этом, по результатам расчетов системы прогнозирования теплового состояния, максимальной температуры 90°C кабель должен достигнуть через 10,2 часа с момента включения. Результаты измерений показали удовлетворительную работу программного обеспечения. Отличия в значениях рассчитанных и измеренных температур не превышали 5°C.

**Доклад В1-209** «Опыт анализа растворенных газов в жидкостях, заполняемых экструдированные и бумажно-масляные концевые муфты в США», авторы – N. SINGH, S. SINGH, R. REYES (США), B. CHOMA (Канада), M. UZELAC, K. ZHOU, T. ZHAO (США).

Анализ растворенных в масле газов в концевых муфтах маслонеполненных кабелей – хорошо разработанный и давно используемый метод для



*Пояснения к рисунку 13:*  
1 – главная секция № 1;  
2 – главная секция №2;  
3 – соединения;  
4 – второстепенная секция;  
5 – жила;  
6 – экран.

Длина второстепенной секции составляла от 1 до 1,4 км.

Применение транспозиции КЛ затрудняет использование традиционных методов, поскольку снижается степень их чувствительности к изменению сопротивления заземления, нелинейности сопротивления нулевой последовательности, сопротивления пробоя, т.е. параметров, определяющих полное сопротивление контура короткого замыкания.

Решить данную проблему позволяет использование в обработке сигнала Вейвлет (Wavelet) – преобразования: интегральное преобразование, которое представляет собой свертку вейвлет-функции с сигналом. Метод хорошо зарекомендовал себя как для коротких, так и для длинных кабельных линий с транспозицией.

**Доклад В1-211** «Разработка и применение на месте компактной on-line системы для определения частичных разрядов при приложении испытательного напряжения в подземных силовых кабелях», авторы – Ju-Но Bae, Seob An, Jae-Hwan Song ,Sang-Ki Lee, Kim-Jin , Kim-Jae Seung ,Tae-Han Kim, Jeon-Seon Lee (Корея).

Существует практика применения портативных датчиков измерения частичных разрядов при испытаниях линий после прокладки во время приложения испытательного напряжения. Этот метод не является достаточно надежным, поскольку испытательное напряжение прикладывается в течение 1 часа и за данный промежуток времени нет гарантии определения нерегулярно возникающих ЧР.

С целью устранения данного недостатка была разработана компактная система непрерывного мониторинга, опробованная на подземной кабельной линии 345 кВ. Помимо фиксации амплитуды ЧР она позволяла проводить амплитудный анализ, частотный анализ и анализ изменения характеристик во времени. Частотный диапазон оборудования – 1 – 50 МГц, разрешение по времени – 10 нс, чувствительность сигнала – 5 пКл, ошибка при обнаружении места источника ЧР – 10 м на 500 м кабеля.

Внешний вид оборудования представлен на рис. 14-а и рис.14-б.



Рис. 14-а. Локальная станция мониторинга ЧР на кабельной линии

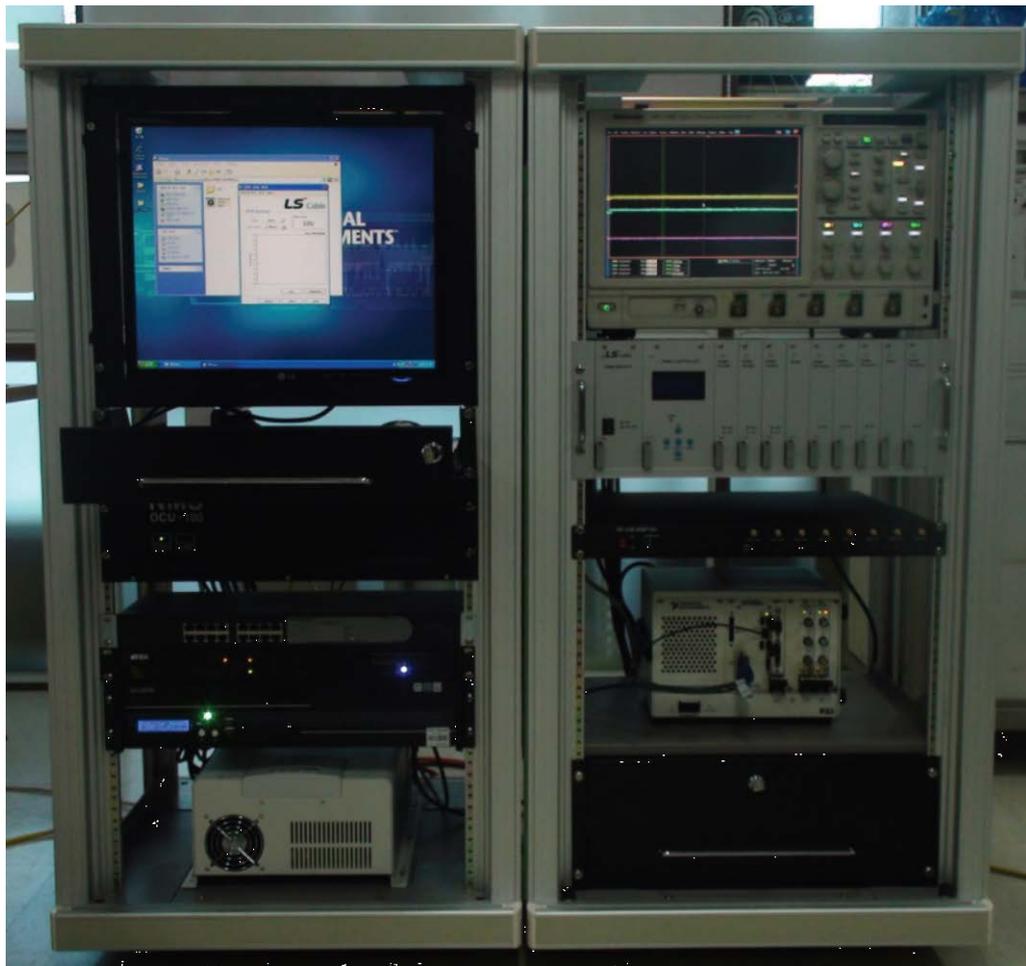


Рис. 14-б. Главная станция мониторинга ЧР на кабельной линии.

#### 4. Обзор докладов по предпочтительной теме 3 «Изолированные кабели в электрических сетях будущего»

**Доклад В1-301** «Инновационное введение кабельных линий большой длины в передающую сеть», авторы – F. LESUR, P. MIREBEAU, M. MAMMERI, J. SANTANA (Франция).

В докладе подробно описываются этапы создания новой кабельной линии 225 кВ протяженностью 110 км в юго-восточной части Франции. Внешний вид кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена представлен на рис. 15.

В зависимости от условий прокладки использовался кабель с сегментными жилами сечениями 2000 мм<sup>2</sup> и 2500 мм<sup>2</sup>. Толщина изоляции составляла 18 – 18,5 мм, толщина оболочки – 5 – 6 мм. Радиальная герметизация выполнялась с помощью барьера из алюмополимерной ленты. Наружная оболочка имела электропроводящее покрытие, которое необходимо для последующих испытаний и поиска повреждений. К проводящему покрытию предъявлялись требования, чтобы его сопротивление находилось в пределах 580 Ом/м – 16 МОм/м.

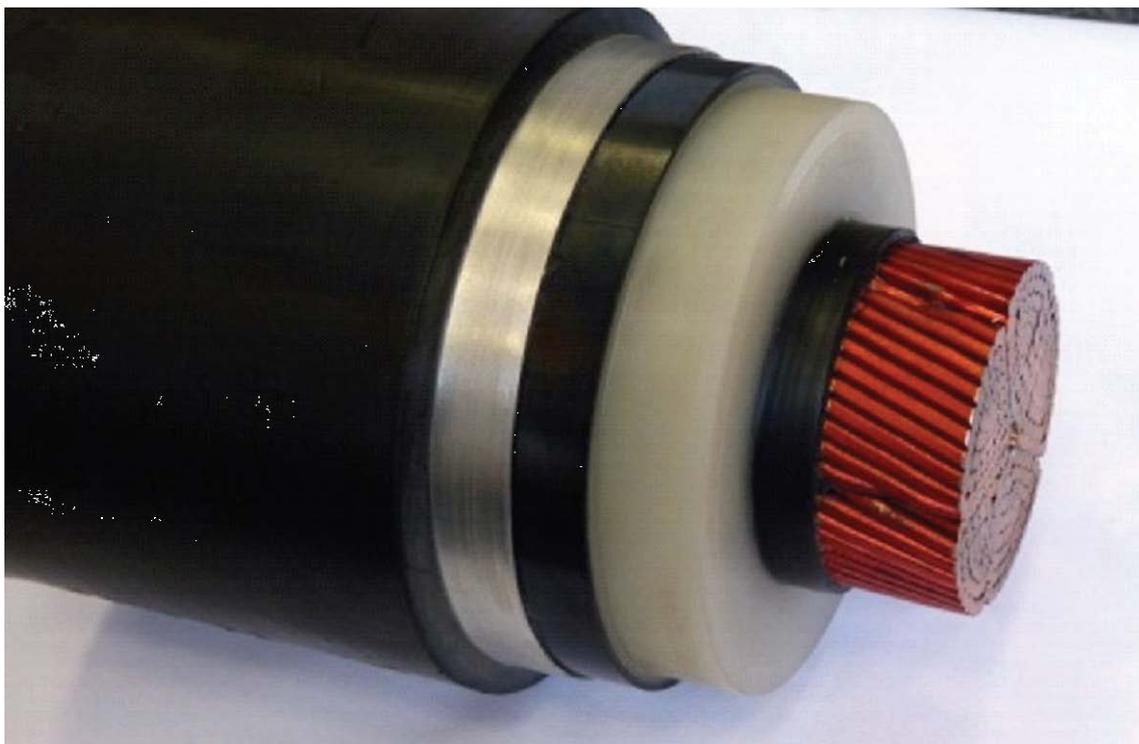


Рис. 15 Внешний вид кабеля 225 кВ для проекта в юго-восточной Франции.

Поставка строительных длин по 1400 м осуществлялась на барабанах по 50 т, что соответственно потребовало сооружение 68 соединительных боксов.

Для используемых в проекте переходных муфт сечений 2000/2500 мм<sup>2</sup> проведены расширенные преквалификационные испытания согласно требованиям стандарта МЭК 62067. Расчет нагрузочной способности проводился

с учетом максимальных температур  $-22^{\circ}\text{C}$  зимой и  $+30^{\circ}\text{C}$  летом (с запасом  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ). Также необходимо было учесть возможность прокладки в будущем параллельной линии. Термическое сопротивление грунта составляло  $0,85$  град·м/Вт зимой и  $1,2$  град·м/Вт летом. При монтаже в 75 % случаев применялось «прямое» транспонирование без применения коробок транспозиции. Величина магнитного поля на высоте 1 м при максимальном токе 1600 А составила  $\leq 30$  мкТл (при норме  $\leq 100$  мкТл).

**Доклад В1-302** «Особые кандидаты для подводных кабельных систем, предназначенных для развития Средиземноморской объединенной сети», авторы – Р. ADAM (Франция), Е. COLOMBO (Италия), S. SIM, А. BURNS (Великобритания).

В настоящее время идет активное обсуждение проекта по сооружению кабельных линий постоянного тока общей мощностью 1 000 МВт (проект Medgrid), соединяющих Северную Африку и Европу. Общая протяженность линий должна составить 600 км, при этом максимальные глубины прокладки могут достигать 2500 м. В связи с этим особое внимание уделяется исследованию возможных вариантов с точки зрения конструкции, технологии строительства, прокладки и ремонта, экономическим аспектам.

На первом этапе (2015 год) предполагается использовать кабель постоянного тока с пропитанной ленточной изоляцией (MI-типа) с алюминиевой жилой на напряжения 350 – 500 кВ. Следующий этап (2020 год) – кабели с экструдированной изоляцией на напряжение 320 – 400 кВ, и на заключительном этапе (2030 год) - кабели с экструдированной изоляцией на напряжение 500 кВ с сечением жилы 1150 мм<sup>2</sup>.

При рассмотрении технологии прокладки необходимо учитывать, что на трассе с глубиной залегания 2500 м динамическая нагрузка может достигать 90 – 115 тонн, поэтому на глубинах 1500 – 2500 м потребуются использование специального кабелеукладчика с гибкой трубой.

Согласно правилам ведения промыслов в Средиземном море существует запрет на траловый лов на глубинах более 1000 м, поэтому в проекте необходимо предусмотреть заглобление кабеля на более мелких участках с использованием специальных подводных плугов, водоструйных аппаратов или траншейных машин, в зависимости от почвы.

С точки зрения экономических оценок, глубина прокладки 1500 м в стоимостном отношении сопоставима с базовой стоимостью, полученной для глубины 500 м, поскольку отсутствуют расходы на заглобление кабеля. На глубинах 1500 – 2500 м расходы на поставку кабеля увеличиваются в 1,22 – 1,32 раза, а на прокладку – приблизительно в 2 раза. При этом понижающий коэффициент из-за отсутствия заглобления равен 0,45.

Как предполагают авторы, закупочная деятельность займет около 2-х лет, предварительная подготовка и согласования 1,7 года; подготовительные

работы на морском дне – 1,25 лет, проектирование – 5-7 лет; производство кабеля 3-5 лет, прокладка 1,5 - 3,4 года; ввод в эксплуатацию – 0,3 года.

**Доклад В1-303** «Проект AmpraCity – передовая сверхпроводящая 10 кВ система для замены традиционной 110 кВ кабельной системы в центре города», авторы – М. STEMMLE, F. MERSCHER, M. NOE, A. HOBL (Германия), N. LALLOUET (Франция).

В докладе содержится новая информация по проекту AmpraCity (Ампа-Сити) стартовавшему в Эссене (Германия) в сентябре 2011 года. Цель проекта – разработка, производство и создание системы на напряжение 10 кВ, 40 МВА передаваемой мощности на основе высокотемпературной сверхпроводимости в составе ограничителя тока и кабеля (рис.16).

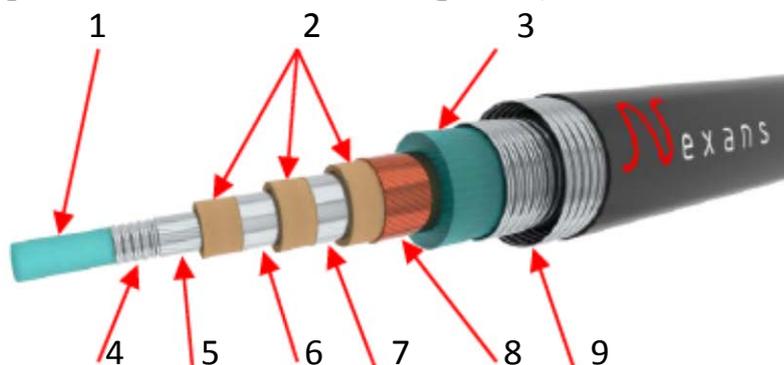


Рис. 16 Конструкция сверхпроводящего кабеля

*Пояснения к рисунку 16:*

*1 – вход жидкого азота;*

*2- изоляция кабеля;*

*3 – выход жидкого азота;*

*4 – формирователь;*

*5 – 7 фазы кабеля;*

*8 – экран;*

*9 – криостат.*

Жила кабеля располагается на гофрированной трубе (формирователе), которая является каналом для входа жидкого азота. Все три фазы и общий экран размещаются концентрично вокруг формирователя и отделяются слоями изоляции. Изоляция выполнена из лент ламинированной полипропиленовой бумаги. Конструкция помещена в криостат с вакуумной теплоизоляцией.

Конструкция выдержала комплекс типовых испытаний к марту 2013 года. При прокладке первоначально по трассе была проложена полиэтиленовая труба диаметром 250 мм и сооружен бокс для соединительной муфты. Кабель поставлялся двумя строительными длинами. В середине декабря 2013 года кабель был проложен и прошел испытания после прокладки. Успешная реализация данного проекта поможет накоплению опыта и послу-

жит катализатором для дальнейшего продолжения сверхпроводящих технологий в энергетику.

**Доклад В1-304** «Разработка и испытания 150-ти кВ кабеля произведенного по высоко инновационной P-LASER технологии», авторы – M. ALBERTINI, A. BAREGGI, L. CAIMI, S. CHINOSI, V. CRISCI, S. FRANCHI BONONI, A. GUALANO, L. GUIZZO, G. PEREGO, G. POZZATI (Италия).

Доклад посвящен разработке и внедрению термопластичного изоляционного материала (технология P-Laser) для кабелей на среднее и высокое напряжение взамен сшиваемых резин и полиэтилена. Помимо изоляционного также разработан полимерный материал для электропроводящих экранов.

В настоящее время в Италии с 2009 года находится в эксплуатации более 21 000 км одножильного кабеля данного типа на среднее напряжение. В Нидерландах также налажено аналогичное производство, а продукция прошла испытания в соответствии с местными требованиями, включая испытания на старение в воде.

Следующим шагом явилось изготовление трех прототипов кабелей с термопластичной изоляцией на напряжение 150 кВ с сечением жилы 1000 мм<sup>2</sup> (рис. 17).

Образцы прошли приемосдаточные испытания, испытания импульсом при повышенных температурах (95°C, 110°C и 130°C). Пробивное импульсное напряжение при данных температурах составило соответственно 1200, 1100 и 950 кВ. Также были проведены испытания напряжением 2 – 3 U<sub>0</sub> при циклическом нагреве до 100 – 110°C с общим числом циклов - 80.

После циклических испытаний образец подвергался вновь импульсным воздействиям по ступенчатой методике и выдержал испытания амплитудой вплоть до 1300 кВ. Далее образец вновь испытывался переменным напряжением при циклическом нагреве и выдержал без пробоя



Рис.17. Внешний вид кабеля по технологии P-Laser

воздействие 375 кВ. Обращает на себя внимание, что испытание изоляции на тепловую деформацию проведено при температурах 130°C, в то время как изоляция из сшитого полиэтилена проходит эти испытания при 200°C.

Дальнейшая программа испытаний соответствовала стандарту МЭК 60840 ( типовые испытания). Кабель был успешно испытан со стандартной арматурой. На данный момент кабель проходит преквалификационные испытания по стандарту МЭК 60840 на той же сборке. Также в опытно-промышленной эксплуатации находится образец кабеля длиной 500 м в сетях компании TERNA на севере Италии.

**Доклад В1-305** «Первая в Японии работающая в сети 66 кВ 220 МВА сверхпроводящая кабельная система», авторы – Т. MIMURA, S. HONJO, T. MASUDA, A. MACHIDA, T. HARA (Япония).

Кабель длиной 240 м на основе высокотемпературной сверхпроводимости был установлен на подстанции компании Tokyo Electric Power company в Йокогаме. В 2011 году собраны системы охлаждения, и после успешных испытаний в октябре 2012 кабель был подключен к энергосети. Это был первый в Японии сверхпроводящий кабель, работающий в промышленной сети.

За прошедшее время никаких неполадок на линии не зафиксировано, температура и давление азота находятся в норме. Некоторые элементы криосистемы и циркуляционные насосы прошли плановое обслуживание, в то время как остальные элементы системы находятся в эксплуатации. После девяти месяцев работы был проверен критический ток кабеля. Никаких изменений по сравнению с его начальным значением не произошло. Кроме того, периодические измерения показывают отсутствие частичных разрядов.

Можно сделать вывод, что сверхпроводящая кабельная система работает удовлетворительно и имеет перспективу стабильной работы в сети в течение длительного срока.

**Доклад В1-306** «Зависимость потерь в броне от тока в трехжильных кабелях: сравнение конечно-элементного анализа и результатов измерений», авторы – М.М. НАТЛО, J.J. BREMNES (Норвегия).

Увеличение передаваемых мощностей по кабелям, а также более высокие уровни напряжения привели в последнее время к существенному увеличению размеров подводных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.



Рис. 18 Внешний вид кабеля 66 кВ на основе высокотемпературной сверхпроводимости, проложенный в Йокогаме (Япония).

Увеличение глубин прокладки ведет к усилению защитных покровов, в том числе и проволочной брони. Для таких габаритных кабелей очень важно иметь методики для расчета потерь в броне. Однако проведенные опыты по прямому измерению токов показали, что использование для расчетов действующего стандарта МЭК 60287-1-1 может приводить к существенному завышению потерь в броне.

Для решения данной проблемы авторами разработана «2,5D»-модель на основе конечно-элементного анализа. С ее помощью рассчитаны 2 базовые конструкции. Результаты расчетов сравнивались с прямыми измерениями активных и реактивных сопротивлений и токов в контуре оболочек. Для первой конструкции с броней из 34 проволок и отдельными свинцовыми оболочками для каждой фазы хорошее соответствие было получено для индуктивных/реактивных параметров цепи. Для активных сопротивлений расчеты по стандарту МЭК 60287 дают завышенные результаты на 20 – 30 %.

Для базовой конструкции 2 с 85 проволоками брони и медными экранами в виде лент метод «2,5D»-моделирования также показал высокую точность. Значения, полученные по МЭК 60287, более чем на 10 % ниже измеренных значений индуктивности, и более чем на 30 % выше измеренных сопротивлений.

**Доклад В1-307** «Развитие водных триингов (влажное старение) изоляции из сшитого полиэтилена в высоковольтных кабельных системах под комбинированным воздействием динамической механической нагрузки и переменного электрического напряжения», авторы – E. ILDSTAD, S.M. HELLESØ, S. HVIDSTEN, H. FAREMO (Норвегия), P. EGROT (Франция), J-O. BOSTRÖM (Швеция), S. NILSSON, J. EEK, J. MATALLANA, H.M. WØLNEBERG (Норвегия).

В докладе представлены результаты лабораторных испытаний и исследований образцов, изготовленных из кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10кВ с сечением жилы 95 мм<sup>2</sup>.

Цель исследований – изучение влияния механических нагрузок на стойкость полимерной изоляции к влажному электрохимическому старению (росту и развитию водных триингов). Актуальность исследований обусловлена ростом количества подводных кабелей, которые в эксплуатации испытывают высокие механические нагрузки (линии офшорных ветроферм, питающие кабели для нефтяных и газовых платформ на шельфе).

Испытуемые образцы помещались в трубы, заполненные водой при комнатной температуре, и подвергались растягивающей статической нагрузке, обеспечивающей 1 % деформации и динамической нагрузке частотой 0,1 Гц. Напряжение, прикладываемое к образцам, составляло 18 кВ (3U<sub>0</sub>) частотой 50 и 500 Гц. Испытательная установка представлена на рис. 19.

Длительность испытаний составила 1 год.

По результатам испытаний сделаны следующие выводы.

Растягивающие механические нагрузки способствуют зарождению водных триингов. Это относится как к статическим, так и к динамическим нагрузкам. Низкая плотность водных триингов типа «веер» на границе наружного электропроводящего экрана может объясняться компенсирующим влиянием внутренних механических напряжений в этой зоне изоляции. Деформации менее 1 % каких либо воздействий на процесс влажного старения не оказывают.

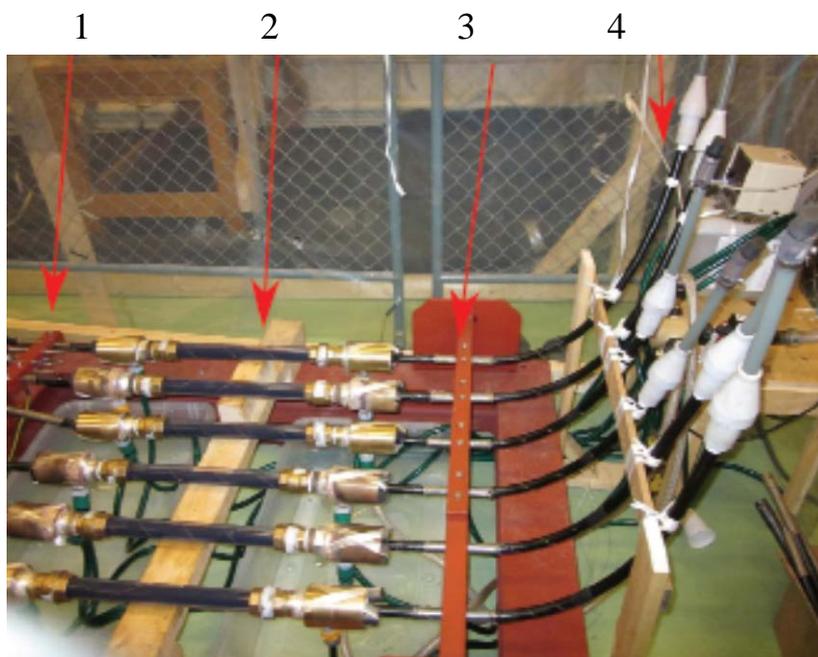


Рис. 18. Внешний вид испытательной установки для исследования стойкости к водным триингам.

*Пояснения к рисунку 18:*

*1 – механический зажим на подвижном конце;*

*2 – образец в трубе с водой;*

*3 – механический зажим на неподвижном конце;*

*4 – концевые муфты.*

**Доклад В1-308** «Текущее состояние разработки кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на постоянное напряжение в Корее», авторы – Т.Н. Lee, S. B. Lee, J. H. Nam, Y. H. Kim, S. K. Lee, I. H. Lee, S. I. Jeon, Y. J. Won, J. S. Kim, J. H. Lee (Корея).

В настоящее время в Корее разработан изоляционный материал для кабелей постоянного тока. При разработке для уменьшения накопления объемного заряда использовался минеральный нано-наполнитель. Материал прошел испытания на моделях. Модель представляла собой мини-кабель с толщиной изоляции 4 мм и сечением проводника 400 мм<sup>2</sup>.

Дальнейшие испытания проводились на полномасштабных образцах. Кабель на напряжение  $\pm 80$  кВ прошел комплекс испытаний в соответствии с рекомендациями ТВ 219. Коммерческое использование данной конструкции началось в апреле 2013 года в проекте линии на остров Jeju.

Кабельные системы  $\pm 250$  кВ были также испытаны для использования в схемах с LCC- и VSC-конверторами в соответствии с рекомендациями CIGRE ТБ 496. Испытания кабельной системы на напряжение  $\pm 320$  кВ планируется провести по аналогичной программе. Все испытания выполнены в соответствии с рекомендациями CIGRE ТБ 496 в первой половине 2014 г.

## **5. Материалы рабочих групп, рассмотренные на Сессии**

На заседании SC B1, состоявшемся 28 августа 2014 г., представлено и обсуждено 50 документов.

Следующими рабочими группами подготовлены заключительные отчеты, которые будут опубликованы в ближайшее время:

- WG B1.34 «Механические силы в системах с кабелями больших сечений»;
- WG B1.35, «Руководство по расчетам нагрузок кабелей высокого напряжения»;
- WG B1.37, «Руководство по работе маслонаполненных кабельных систем»;
- WG B1.40, «Кабели для офшорных ветроферм»
- WG B1.42. «Рекомендации по испытаниям переходных муфт в линиях постоянного тока на напряжения до 500 кВ»;
- WG B1.43. «Рекомендации по механическим испытаниям подводных кабелей».

Образованы следующие новые рабочие группы:

- WG B1.50. «Ограничители перенапряжений и соединительные устройства (конструкции, испытания, эксплуатация, мониторинг)»;
- WG B1.51. «Вопросы пожарной безопасности кабелей, проложенных в воздухе»;
- WG B1.52. «Определение мест повреждений подводных и подземных кабелей»;
- TF B1.53. «Предотвращение повреждений кабелей, связанных с прокладкой» - решение будет принято после дополнительных консультаций;
- TF B1.54. «Поведение кабельных систем при больших возмущениях (землетрясение, буря, наводнение, пожар, оползень, изменение климата)».

## 6. Обзор материалов Технической выставки «CIGRE 2014» по тематическому направлению В1

Техническая выставка «CIGRE 2014» прошла с 25 по 29 августа 2014 г. параллельно с работой 45-й Сессии CIGRE. На выставке были широко представлены компании, занимающиеся передачей и распределением электроэнергии, производители энергетического и электротехнического оборудования, компании, занимающиеся испытанием и мониторингом электротехнических объектов (CESI, Италия; КЕМА, Нидерланды; LIOS Technology, Германия; BAUR, Австрия, HAEFELY TEST, Швейцария, HIGHVOLT, Германия и др.), ведущие производители материалов (Borealis AG, Австрия; Wacker Chemie AG, Германия и др.).

Компания B2B Electronic, Австрия, в числе высоковольтного испытательного оборудования представила установки для испытания кабельных линий частотой 0,1 Гц на напряжения от 28 до 200 кВ. Данные установки имеют малый вес и габариты за счет использования оборудования сухого типа.

В экспозиции от России были представлены порядка 40 компаний по разным направлениям деятельности в области энергетики.

**В разделе кабелей и арматуры** на выставке были представлены практически все ведущие мировые производители: ABB (Швейцария), BRUGG AG (Швейцария), Furukawa Electric (Япония), PFISTERER (Франция), NEXANS (Франция), NKT CABLES GMBH (Германия), PRYSMIAN EC (Италия), др.

Из отечественных производителей по кабельной тематике свою продукцию представил завод «ТАТКАБЕЛЬ». Завод выступил как производитель кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 220 кВ.

Большая экспозиция бала представлена южнокорейской компанией LS Cable&System. Компания готова поставлять следующую продукцию. Кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 500 кВ с сечением жилы (медь) до 3000 мм<sup>2</sup> в оболочках из алюминия и свинцового сплава. Максимальная толщина изоляции составляет 34 мм, диаметр жил – до 69 мм. Кабельная линия комплектуется необходимыми соединительными и концевыми муфтами, системой температурного мониторинга, датчиками-детекторами частичных разрядов. Также компания представила свой опыт в области производства и технологии прокладки подводных кабелей. Данный тип кабелей производится с изоляцией из сшитого полиэтилена на переменное напряжение (до 400 кВ), постоянное напряжение (до 500 кВ с пропитанной MI изоляцией и до 320 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена). Опыт компании подтверждается участием в проектах Jindo-Jeju, Корея (кабель 252 кВ, MI – типа, длина линии 122 км, глубина прокладки – до 160 м), Konti-Skan, Дания (285 кВ, 23,5 км, максимальная глубина – 35 м).

Большое количество представленных экспонатов, как от кабельных производителей, так и от специализированных фирм было посвящено кабельной арматуре. Так фирма BRUGG представила концевые муфты на напряжение до 420 кВ, устойчивые к токам короткого замыкания. Конструкция муфты позволяет снизить вероятность ее разрушения при токах короткого замыкания до 63 кА (при длительности не более 0,5 с). Фирма PFISTERER в числе других образцов представила конструкцию муфты EHV-CONNEX на напряжение 420 кВ, с сечением жил до 3000 мм<sup>2</sup> и номинальным током до 4 000 А.

## **7. Заключение**

Материалы 45-й Сессии свидетельствуют о следующих тенденциях в области изолированных кабелей:

- 1) активно развивается направление, занимающееся разработкой подводных кабелей, особенно тех, которые обеспечивают передачу электроэнергии от возобновляемых источников (ветрогенераторы, морские платформы);
- 2) продолжается поиск и разработка дополнительных методов испытаний, позволяющих обеспечивать максимальную надежность кабельных линий;
- 3) значительно возрос интерес к отдельным элементам арматуры кабельных систем (ограничителям перенапряжений, заземлителям, соединителям и др.), разрабатываются методы их испытаний;
- 4) продолжают работы по созданию новых кабельных материалов, на рынок представлены кабели на среднее и высокое напряжение с термопластичной изоляцией.