СИГРЭ. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМИТЕТ B1 «ИЗОЛИРОВАННЫЕ КАБЕЛИ»

АВТОР:

ОВСИЕНКО В.Л.,
ОАО «ВНИИКП»

В августе 2014 г. в столице Франции прошло знаковое для всех электроэнергетиков мероприятие – 45-я сессия Международного совета по большим электроэнергетическим системам CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques). Мы продолжаем нашу традицию – подробно рассказать о результатах работы очередной сессии этой организации. В данном номере обсуждается исследовательский комитет (ИК) B1 «Изолированные кабели», который обсуждает и изучает весь комплекс вопросов, связанных с проектированием, разработкой и эксплуатацией современных кабелей. Всего в рамках 45-й сессии СИГРЭ было рассмотрено 33 доклада по следующим основным темам: «Новые или модернизированные подземные и подводные кабельные системы постоянного и переменного тока», «Наиболее эффективное использование существующих кабельных систем», «Изолированные кабели в электрических сетях будущего».

Ключевые слова: высоковольтные кабельные системы, подземные кабели, высоковольтные кабели постоянного тока с экструдированной изоляцией, реконструкция, мониторинг, измерения частичных разрядов, испытания.

Исследовательский Комитет B1 CIGRE «Изолированные кабели»

ВВЕДЕНИЕ

Основные направления деятельности Исследовательского комитета (ИК) B1 «Изолированные кабели» СИГРЭ – разработка методов расчетов, конструирования, испытаний, прокладки, эксплуатации силовых кабельных линий (на напряжения свыше 30 кВ). Комитет объединяет производителей кабельной продукции, потребителей (энергетические компании) и исследовательские организации (институты, университеты).

ТЕКУЩАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМИТЕТА (ИК) B1

На заседании ИК B1, состоявшемся 28 августа 2014 г., представлено и обсуждено порядка 50 документов, заслушаны отчеты о работе более 30 рабочих групп.

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)».

Итоговые документы в виде обзоров или технических брошюр публикуются в журнале ELECTRA.

ОБЗОР ДОКЛАДОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ НА 45-Й СЕССИИ ПО ТЕМАТИКЕ ИК B1

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

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 пять проблем:

- необходимость разработки в будущем специфических дополнительных методов испытаний и формулирование дополнительных требований, кроме существующих в настоящее время требований CIGRE и МЭК;
- влияние развития ветроэнергетики на кабельные системы, что является важным в проектировании, эксплуатации, характеристиках кабелей, используемых при создании ветроферм;
- трудности, возникающие при процедурах получения различного рода разрешений и согласований при проектировании и строительстве КЛ, обеспечение экологических требований;
- сооружение кабельных линий в городских условиях, существующие положение дел, трудности, новые методы и приемы прокладки КЛ;
- повышение качества и надежности соединительных и концевых муфт, квалификации участников монтажных работ, режимы и методы испытаний линий после прокладки.

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 пять проблем:

- тенденции и новые методы определения мест повреждения подземных и подводных кабелей;
- новые подходы и новые методики измерения частичных разрядов – инструмента, используемого как для анализа качества кабельной линии непосредственно после прокладки, так и для мониторинга текущего состояния во время эксплуатации;
- температурный мониторинг, направления его развития, пути совершенствования;
- новые или находящиеся в стадии разработки методы испытания кабельной линии после прокладки;
- вопросы эксплуатации, обслуживания, замены кабельных линий (используемые методы и техническая политика, пути их улучшения).

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 восемь статей, на обсуждение вынесены следующие проблемы:

- кабели на постоянное напряжение с экструдированной изоляцией (каких уровней напряжения для этих изделий следует ожидать в будущем);
- 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);
- 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);
- основные проблемы в области разработки и испытания подводных кабельных систем для больших глубин, плавучих платформ и линий большой длины;
- разделы кабельной техники, где должны быть обновлены существующие стандарты.

В прозвучавших выступлениях и обсуждении подчеркивалась необходимость разработки дополнительных (помимо существующих в 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, кабелям с большим (2500–3000 мм^2) сечением жил или с жилами, где применяются эмалированные проводники, офшорным кабелям, испытывающим динамическую нагрузку.

Важным было признано направление, связанное с испытаниями после прокладки КЛ. Подчеркивалось, что данные испытания – это проверка прежде всего качества монтажа КЛ, поскольку все ее компоненты уже протестированы на заводе-изготовителе.

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

Многие подчеркивали, что повышенное внимание необходимо уделить дополнительному контролю качества арматуры. По информации испытательного центра KEMA (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, кабелей, предназначенных для прокладки на больших глубинах, а также 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 продления срока эксплуатации КЛ.

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

ОБЗОР ДОКЛАДОВ ПО ТЕМЕ 1 «НОВЫЕ ИЛИ МОДЕРНИЗИРОВАННЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ И ПОДВОДНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА»

B1-101. SEYBOLD F. W., MEDAGLIA L. A., RUIZ I. M. (АРГЕНТИНА). «ПРИМЕНЕНИЕ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ Т-ОБРАЗНЫХ МУФТ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОДЗЕМНЫХ КАБЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ»

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).

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ Т-ОБРАЗНОЙ МУФТЫ НА ПОДСТАНЦИИ КОСТАНЕРА (АРГЕНТИНА):

Рис. 1

B1-102. TANG K., PATON D., BUCEA G. (АВСТРАЛИЯ), MASHIO S., MURAMATSU Y. (ЯПОНИЯ). «ИСПЫТАНИЯ КАБЕЛЯ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА НАПРЯЖЕНИЕ 330 КВ ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ»

Авторы доклада справедливо отмечают, что стандартные типовые испытания при максимальной температуре 100 °С не отражают реальных условий эксплуатации, когда кабель кратковременно может перегреваться до температуры 105 °С. 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 °С 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.

B1-103. BEGHIN V., SZCZEPANSKI C., BECKER J. (БЕЛЬГИЯ). «РАСШИРЕННАЯ ПРОГРАММА ТИПОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ НОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ»

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 было принято решение увеличить число испытательных циклов нагрева-охлаждения со стандартных 20 до 100. Кроме того, с целью проверки соединительных муфт в программу испытаний входило троекратное воздействие токами КЗ с последующим обследованием изоляционных материалов методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и обследованием мест соединения жил. Испытания закончились с положительным результатом.

B1-104. PEIXOTO C. D., LOPES J. C. R., DE LOUREDO N. H. G. R., KARABOLAD FILHO E. (БРАЗИЛИЯ). «ВНОВЬ ПРОЛОЖЕННЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В БРАЗИЛИИ»

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 маслонаполненной 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%.

B1-105. ZHANG D., WERLE V., JUNG J. (ГЕРМАНИЯ). «ПЕРВЫЕ ПРОЕКТЫ ПО ИНТЕГРАЦИИ ЭНЕРГИИ ОТ ВЕТРОФЕРМ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА В СЕВЕРНОМ МОРЕ В ГЕРМАНИИ: ОПЫТ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ»

Подключение офшорных ветроферм к электрическим сетям Германии началось в 2006 г. К 2020 г. 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 г. уже осуществлено 11 присоединений. Общая протяженность кабеля составила 2919 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 ±1 м). Большой проблемой, по мнению авторов, является отсутствие в настоящее время международных стандартов, которые бы охватывали каждый компонент системы, а также все процедуры, от проектирования до эксплуатации.

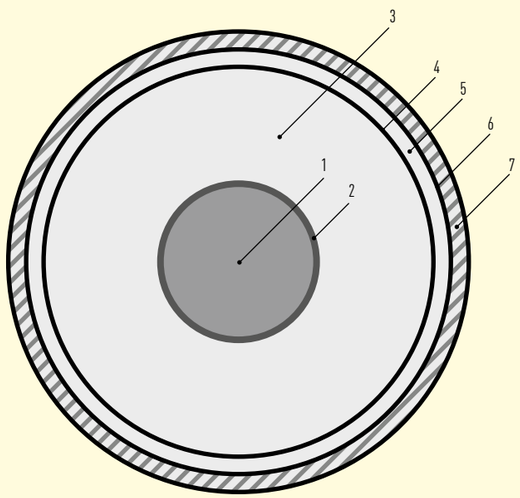
B1-106. SHARMA K., KUMAR P., RAO M. S., SONAR V. G., TALANDE T. V., PHADNIS A. K. (ИНДИЯ). «ГОРОДСКИЕ КАБЕЛИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ НА НАПРЯЖЕНИЕ 220 КВ: КОНЦЕПЦИЯ БУДУЩЕГО»

В докладе обсуждаются проблемы, связанные с постоянным увеличением объема потребляемой электроэнергии на душу населения в городах. В связи с этим растут плотность городских кабельных систем и связанные с этим трудности. В докладе на примере кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена, с сечением жилы 1200 мм^2 (медь) показаны этапы создания кабельных линий 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 высокой 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 концевые муфты наружной установки.

B1-107. FORTELEONI M., LICCIARDI V.P., REBOLINI M. (ИТАЛИЯ). «УРОКИ, ИЗВЛЕЧЕННЫЕ ИЗ ПРОЦЕДУРЫ ПОЛУЧЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЙ И СОГЛАСОВАНИЯ ПРОЕКТА ПОДЗЕМНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ 150 КВ "ЮЖНЫЙ КАЛЬЯРИ – РУМЬЯНКА" (ИТАЛИЯ)»

Авторы отмечают стабильный годовой рост числа 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 экологи-

СХЕМА ПРОКЛАДКИ И КОНСТРУКЦИЯ КАБЕЛЯ:



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

Рис. 2

ПРИМЕР ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КАБЕЛЯ, ПЕРЕДАЮЩЕГО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ ОТ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

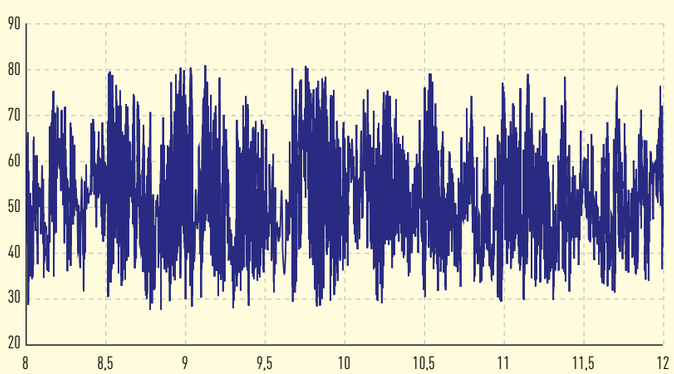


Рис. 3

ческих 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 г. 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 ч, составляет 5 кВ/м, магнитного – 3 мкТл.

Окончательно для проекта был выбран кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена с жилой сечением 1600 мм^2. Конструкция кабеля и схема прокладки представлены на рис. 2. Кабель проложен симметричным треугольником для уменьшения электромагнитного поля вокруг линии.

B1-108. PILGRIM J. A., CATMULL S., CHIPPENDALE R., LEWIN P. L., STRATFORD P., TYREMAN R. (ВЕЛИКОБРИТАНИЯ). «ОПТИМИЗАЦИЯ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ КАБЕЛЕЙ, ПЕРЕДАЮЩИХ ЭНЕРГИЮ ОТ ОФШОРНЫХ ВЕТРОФЕРМ»

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.

ПЕРЕХОДНАЯ МУФТА В СБОРЕ

Рис. 4

СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕХОДНОЙ МУФТЫ:

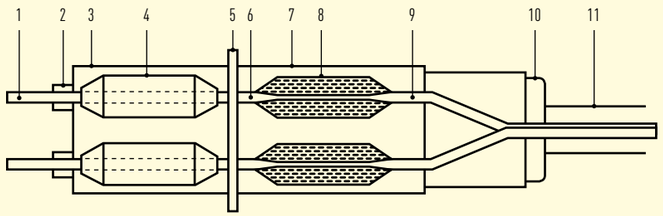


Схема расположения элементов переходной муфты: 1 – кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена; 2 – наружное уплотняющее устройство; 3 – стальной кожух со стороны полиэтиленового кабеля; 4 – предварительно отлитое тело муфты; 5 – центральная стопорная пластина; 6 – соединительная гильза Voltalit; 7 – телескопический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

Рис. 5

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^2. 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 четыре года эксплуатации ветрофермы (рис. 3) показывает, что ветровая нагрузка непостоянна, и кабель не достигает максимальных температур, поскольку постоянная времени системы составляет более 300 ч. В будущем при накоплении опыта эксплуатации этот факт также должен учитываться при определении нагрузочной способности КЛ.

B1-109. MAKOVOZ J. R. (США). «ПЕРЕХОДНАЯ МУФТА НА НАПРЯЖЕНИЕ 138 КВ МЕЖДУ МАСЛОНАПОЛНЕННЫМ КАБЕЛЕМ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И КАБЕЛЕМ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА»

Представленное в докладе устройство было 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^2 и пропитанную бумажную изоляцию толщиной 12,45 мм. Полиэтиленовый кабель выполнен с медной жилой сечением 760 мм^2 и изоляцией толщиной 18,4 мм. Муфта в сборе представлена на рис. 4, а на рис. 5 показано схематическое расположение ее элементов.

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 шесть суток.

B1-110. WATANABE A., ITOU Y., SASAKI H., KATAKAI S., WATANABE M., MURATA Y. (ЯПОНИЯ). «ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КАБЕЛЯ ±250 КВ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ ХОККАЙДО–ХОНСЮ»

В докладе отмечается, что на момент ввода линии в эксплуатацию в декабре 2012 г. 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

ВНЕШНИЙ ВИД ПОДВОДНОГО КАБЕЛЯ DC ±250 КВ

Рис. 6

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^2) , наземного – 1,3 км (сечение жилы 900 мм^2). 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 предквалификационных 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 длилась 134 суток, что является отступлением от международных рекомендаций. Однако после ее успешного завершения и принятия положительного решения о применении кабеля были выполнены годичные (360 суток) испытания в полном соответствии с требованиями ТВ 219 и ТВ 496 СИГРЕ.

B1-111. LUNDQUIST J. (ШВЕЦИЯ), ENGELBRECHT C. (НИДЕРЛАНДЫ), THUNBERG E., JANSSON H., DUBICKAS V., WORZYK T. (ШВЕЦИЯ). «УРОВЕНЬ ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ЭКСТРУДИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ»

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 СИГРЭ ТВ 496, согласно которым уровень импульсных испытательных напряжений для кабелей на постоянное напряжение с экструдированной изоляцией в явном виде не устанавливается. Амплитуда испытательного импульса должна выбираться, исходя из характеристик конкретной системы.

B1-112. MEIJER S., DE WILD F.H., KUIK G.R., TER HAAR J., ROSS R. (НИДЕРЛАНДЫ), WASCHK V. (ГЕРМАНИЯ). «ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕДУР ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ И КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА НА УСПЕШНЫЙ ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ДЛИННЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА НАПРЯЖЕНИЕ 380 КВ»

В последнее 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 предквалификационных, типовых и приемо-сдаточных испытаний в соответствии с требованиями стандарта МЭК 62067. На элементах арматуры измерялись частичные разряды, проводились испытания переменным напряжением и грозовыми импульсами амплитудой 1425 кВ. В случае электрических пробоев при испытаниях проводилось углубленное исследование образцов с выявлением причин отказа и принятием мер по улучшению качества. После прокладки каждая фаза линии была успешно испытана напряжением 374 кВ с измерением уровня частичных разрядов.

B1-113. KLEBO-ESPE B., BJERKE L. (НОРВЕГИЯ), GUDMUNDSDOTTIR U. S., KVARTS T. (ДАНИЯ). «НОВЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ МОНТАЖА КАБЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА НАПРЯЖЕНИЕ 500 КВ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В ПРОЕКТЕ SKAGERRAK-4 МЕЖДУ ДАНИЕЙ И НОРВЕГИЕЙ»

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

ПРОКЛАДКА КАБЕЛЯ В ДАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО ТРЕЙЛЕРА

Рис. 7

СПЕЦИАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СОЗДАНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ТРАНШЕИ НА ГЛУБИНАХ 10–30 М

Рис. 8

Проект состоял из трех 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; 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 осуществлялась на барабанах диаметром 4,5 м и длиной 7,75 м. Сечение жилы кабеля составляло 1600 мм^2 (медь), масса кабеля – 35 кг/м. Для транспортировки кабеля потребовался специальный 12-осный трейлер грузоподъемностью 120 т (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.

B1-114. AL JALLAF S., BUSAMRA H., AL ROKEN K., GEORGE J. (ОАЭ), POPIEL L., MOREAU O., JARRY O. J. (ФРАНЦИЯ). «ГИБКИЙ ПОДХОД В ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕСТЕСТВЕННО- ИЛИ ПРИНУДИТЕЛЬНО ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ТОННЕЛЕЙ ДЛЯ СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ГОРОДСКУЮ СРЕДУ»

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

РАСПОЛОЖЕНИЕ ФАЗ ДВУХЦЕПНОЙ КЛ 400 КВ В ДУБАЕ

Рис. 9

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 был разделен на две части пожарной перегородкой. Кабельная линия состояла из двух цепей с жилой 2500 мм^2 (медь). Фазы располагались вертикально вдоль противоположных стен (рис. 9).

Для естественной вентиляции было предусмотрено сооружение восьми 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 °С.

ОБЗОР ДОКЛАДОВ ПО ТЕМЕ 2 «НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ»

B1-201. BAWART M. (АВСТРИЯ), MARZINOTTO M., MAZZANTI G. (ИТАЛИЯ). «БОЛЕЕ ГЛУБОКОЕ ПОНИМАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ДЛИННЫХ ПОДВОДНЫХ СИЛОВЫХ ЛИНИЯХ»

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) 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. Выбор 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, обладая крупными емкостями, такие линии имеют большой запас статического электричества. Так, линия в 400 км при испытательных напряжениях в 32 кВ запасает энергию 76,8 кДж.

РОССЕТИ
ЭКСПОЦЕНТР

Оборудование
для электроэнергетики

19–22 октября
2015
8–11 июня

Электрооборудование.
Промышленная светотехника.
Автоматизация зданий
и сооружений

www.elektro-expo.ru

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФОРУМ
RUGRIDS ELECTRO
www.rugrids-electro.ru
#RugridsElectro

Международная выставка
ЭЛЕКТРО

Реклама

B1-202. PHUNG B.T., LIU Z., BLACKBURN T.R., BURGESS G., MCMULLAN P., ZHANG H. (АВСТРАЛИЯ). «ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ И ОНЛАЙН МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ»

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. Исходя из опыта 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.

B1-203. HENNUY B., LEEMANS P., MAMPAEY B., BURCEANU M., VAN SLYCKEN J. (БЕЛЬГИЯ). «ФИЛОСОФИЯ И ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ДАТЧИКОВ, А ТАКЖЕ БУДУЩЕЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В БЕЛЬГИИ»

В период 2008–2009 гг. в Бельгии были 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 tg δ изоляции говорили о ее удовлетворительном качестве. После демонтажа арматуры в ней были обнаружены дефекты, служившие причинами повышенного уровня ЧР (пример приведен на рис. 10).

ПРИМЕР ДЕФЕКТА РАЗДЕЛКИ КАБЕЛЯ НА НАПРЯЖЕНИЕ 36 КВ, ПОСЛУЖИВШЕГО ПРИЧИНОЙ ВЫСОКОГО УРОВНЯ ЧР

Рис. 10

ТИПОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ КАБЕЛЯ НА НАПРЯЖЕНИЕ 220 КВ

Рис. 11

На основании этих измерений была выработана стратегия замены 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, причем особенно перспективно их применение в подводных кабелях.

B1-204. XU Y., LIU B., XUE J., LI H., LA Y. (КИТАЙ). «СОЧЕТАНИЕ ИСПЫТАНИЙ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ РЕЗОНАНСНОЙ УСТАНОВКИ И ИЗМЕРЕНИЕМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ПРИ ЗАТУХАЮЩЕМ НАПРЯЖЕНИИ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ»

Основной трудностью при полевых испытаниях кабелей, по мнению авторов, является тот факт, что используемая резонансная установка для испытания напряжением частотой 20–300 Гц практически непригодна для измерения частичных разрядов, поскольку дает достаточно большие помехи. Для этих целей больше подходит измерение с помощью системы OWTS (измерительная система на основе колеблющихся волн). Проведенные испытания на кабелях среднего напряжения показали, что для линий до пяти лет эксплуатации критическим является уровень ЧР 100 пКл для кабеля и 300 пКл для арматуры. Для линий, которым более пяти лет, данный критерий установлен на уровне 500 пКл.

B1-205. EL FARASKOURY A., GOUDA O., MOKHTAR M., MEHANN M. (ЕГИПЕТ). «ОПЫТ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НА ТИПОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ МЭК И ИСПЫТАНИЯ ПОСЛЕ ПРОКЛАДКИ КАБЕЛЕЙ С ЭКСТРУДИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ»

В докладе представлены результаты электрических типовых испытаний кабеля на напряжение 220 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена с сечением жилы 1200 мм^2. В состав испытательной сборки входили три соединительные и две концевые муфты. Программа испытаний была 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.

B1-206. GARNACHO F., TRASMONTE I., MARTIN R., SÁNCHEZ-URÁN M.A., ORTEGO J., ÁLVAREZ F., PRIETO D., VALLEJO J., JIMÉNEZ M.A. (ИСПАНИЯ). «ОПЫТ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НА ПРОЛОЖЕННЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ»

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 четыре 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 истечение 35 дней наблюдений было принято решение о перемонтаже 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.

B1-207. FERNANDEZ R.G., LOPEZ-MENCHERO M.D., CONEJO G.D. (ИСПАНИЯ). «ОПЫТ КОМПАНИИ REE (RED ELÉCTRICA DE ESPAÑA) ПО ПРОФИЛАКТИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОДЗЕМНЫХ КАБЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ТОКОВ В ЭКРАНАХ»

Доклад подводит итоги экспериментальных работ, начатых в 2008 г.

в высоковольтных кабельных сетях Барселоны. В 27 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 их величины 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.

УЧАСТОК ДЕФЕКТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ МУФТЫ 45 КВ

Рис. 12

B1-208. CHIMI E., HEIMBACH B., BADER J., LUTERNAUER H. (ШВЕЙЦАРИЯ). «ПИЛОТНЫЙ ПРОЕКТ В ЦЮРИХЕ (ШВЕЙЦАРИЯ) ПО МОНИТОРИНГУ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ КАБЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТОВОЛОКНА И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ»

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 °С. 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 °С кабель должен достигнуть через 10,2 ч с момента включения. Результаты измерений показали удовлетворительную работу программного обеспечения. Различия в значениях рассчитанных и измеренных температур не превышали 5 °С.

B1-209. SINGH N., SINGH S., REYES R. (США), CHOMA B. (КАНАДА), UZELAC M., ZHOU K., ZHAO T. (США). «ОПЫТ США ПО АНАЛИЗУ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОНЦЕВЫХ МУФТАХ НА ОСНОВЕ ЭКСТРУДИРОВАННОЙ И БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ, С УЧЕТОМ ИХ РАЗЛИЧИЙ»

Анализ растворенных в масле газов в концевых муфтах маслонаполненных кабелей – хорошо разработанный и давно используемый метод оценки состояния кабельной арматуры. В концевых муфтах кабельных линий с экструдированной изоляцией также используются изоляционные жидкости. Однако измерение их параметров в процессе эксплуатации не так распространено. Более того, производители арматуры стараются исключить возможность отбора проб после монтажа, делая конструкции полностью необслуживаемыми.

В США применение муфт с полимерными изоляционными элементами началось еще с 1960-х гг. На настоящий момент таких конструкций имеется порядка 7500, в основном на напряжения 69–138 кВ. В докладе представлена методика анализа растворенных в жидкостях газов с учетом специфики конструкций с экструдированной изоляцией. При анализе результатов было установлено, что содержание метана не является показателем интенсивности процессов старения. Повышенное содержание метана может быть также следствием диффузии газа непосредственно из полимерных элементов. Также необходимо учитывать влияние технологии изготовления изоляции (старая технология вулканизации в среде перегретого пара или современная технология вулканизации в среде азота). Анализ велся по 12 показателям: девять углеводородов, H_2, CO, CO_2. Одним из характерных показателей было признано содержание ацетилена (для маслонаполненных кабелей в пределах 20–150 ppm, для экструдированных – 6–10 ppm).

B1-210. JENSEN C. F., BAK C. L. (ДАНИЯ). «МЕТОД БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ДЛЯ ПОИСКА МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЙ КАБЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ТРАНСПОЗИЦИЕЙ В ПОДЗЕМНЫХ ПЕРЕДАЮЩИХ СИСТЕМАХ»

ТИПИЧНАЯ СХЕМА КЛ С ТРАНСПОЗИЦИЕЙ ЭКРАНОВ (ОБОЛОЧЕК):

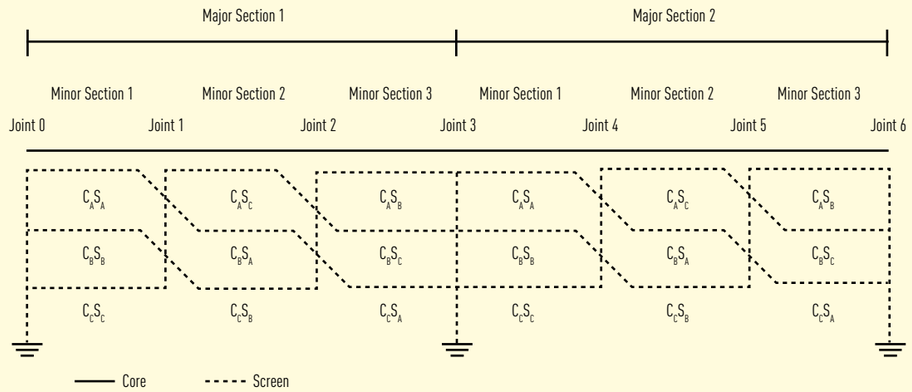


Рис. 13 1 – главная секция № 1; 2 – главная секция №2; 3 – соединения; 4 – второстепенная секция; 5 – жила; 6 – экран

В докладе представлен метод обнаружения мест повреждения кабелей переменного тока с использованием прибора, основанного на принципе Вейвлет (Wavelet)-преобразования. Измерения проводились на секции транспонированной кабельной линии на напряжение 245 кВ, соединяющей ветроферму «Анхольт» и основную электрическую сеть Дании. Типичная схема КЛ с транспозицией экранов (оболочек) показана на рис. 13. 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.

B1-211. JU-HO BAE, SEOB AN, JAE-HWAN SONG, SANG-KI LEE, KIM-JIN, KIM-JAE SEUNG, TAE-HAN KIM, JEON-SEON LEE (КОРЕЯ). «РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НА МЕСТЕ КОМПАКТНОЙ ON-LINE СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ПРИ ПРИЛОЖЕНИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЯХ»

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 ч. 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 составлял 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 и 15.

ОБЗОР ДОКЛАДОВ ПО ТЕМЕ 3 «ИЗОЛИРОВАННЫЕ КАБЕЛИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ БУДУЩЕГО»

B1-301. LESUR F., MIREBEAU P., MAMMERI M., SANTANA J. (ФРАНЦИЯ). «ИННОВАЦИОННОЕ ВВЕДЕНИЕ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ В ПЕРЕДАЮЩУЮ СЕТЬ»

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. 16. В зависимости от условий прокладки использовался кабель с сегментными жилами сечениями 2000 мм^2 и 2500 мм^2. 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.

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^2 были проведены расширенные предквалификационные испытания в соответствии с требованиями стандарта МЭК 62067. Расчет нагрузочной способности проводился с учетом максимальных температур 22 °С зимой и 30 °С летом (с запасом +5 °С). 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 ≤30 мкТл (при норме ≤100 мкТл).

B1-302. ADAM P. (ФРАНЦИЯ), COLOMBO E. (ИТАЛИЯ), SIM S., BURNS A. (ВЕЛИКОБРИТАНИЯ). «ОСОБЫЕ КАНДИДАТЫ ДЛЯ ПОДВОДНЫХ КАБЕЛЬНЫХ

ЛОКАЛЬНАЯ СТАНЦИЯ МОНИТОРИНГА ЧР НА КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

Рис. 14

ГЛАВНАЯ СТАНЦИЯ МОНИТОРИНГА ЧР НА КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ

Рис. 15

ВНЕШНИЙ ВИД КАБЕЛЯ 225 КВ ДЛЯ ПРОЕКТА В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ФРАНЦИИ

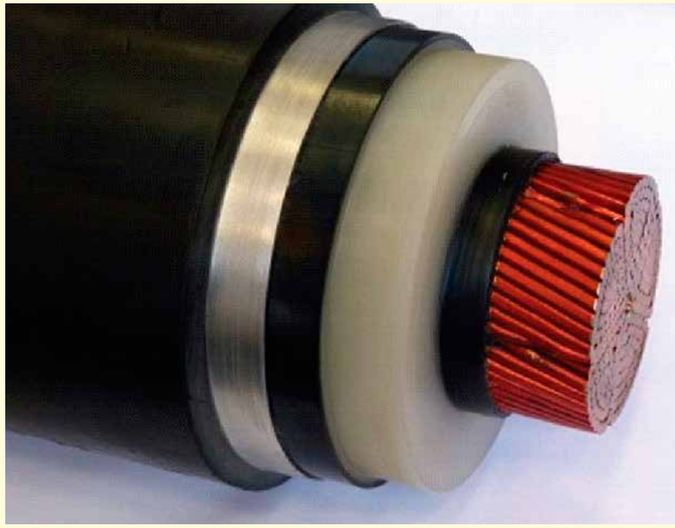


Рис. 16

СИСТЕМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАЗВИТИЯ СРЕДИЗЕМНОМОРСКОЙ ОБЪЕДИНЕННОЙ СЕТИ»

В настоящее время идет активное обсуждение проекта по сооружению кабельных линий постоянного тока общей мощностью 1000 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, экономических аспектов.

На первом этапе (2015 г.) предполагается использовать кабель постоянного тока с пропитанной ленточной изоляцией (MI-типа) с алюминиевой жилой на напряжения 350–500 кВ, на следующем этапе (2020 г.) – кабели с экструдированной изоляцией на напряжение 320–400 кВ, на заключительном этапе (2030 г.) – кабели с экструдированной изоляцией на напряжение 500 кВ с сечением жилы 1150 мм^2. При рассмотрении технологии прокладки необходимо учитывать, что на трассе с глубиной залегания 2500 м динамическая нагрузка может достигать 90–115 т, поэтому на глубинах 1500–2500 м потребуется 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 заглубление 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 в 1500 м в стоимостном отношении сопоставима с базовой стоимостью, полученной для глубины 500 м, поскольку отсутствуют расходы на заглубление 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 заглубления равен 0,45.

Как предполагают авторы, закупочная деятельность займет около двух лет, предварительная подготовка и согласования – 1,7 года, подготовительные работы на морском дне – 1,25 года, проектирование – 5–7 лет, производство кабеля – 3–5 лет, прокладка – 1,5–3,4 года, ввод в эксплуатацию – 0,3 года.

B1-303. STEMMLE M., MERSCHEL F., NOE M., HOBL A. (ГЕРМАНИЯ), LALLOUET N. (ФРАНЦИЯ). «ПРОЕКТ AMPACITY – ПЕРЕДОВАЯ СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ 10 КВ СИСТЕМА ДЛЯ ЗАМЕНЫ ТРАДИЦИОННОЙ 110 КВ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В ЦЕНТРЕ ГОРОДА»

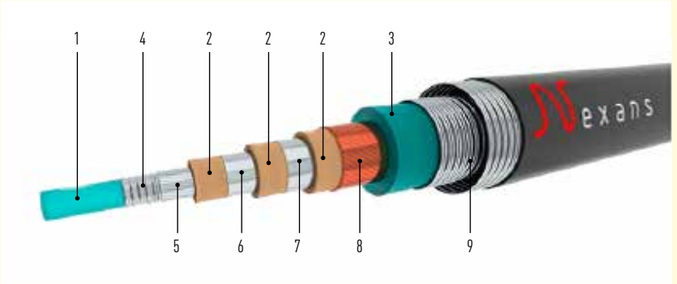
В докладе содержится новая информация по проекту «Ампа-сити» (AmpaCity), стартовавшему в Эссене (Германия) в сентябре 2011 г. Цель проекта – разработка, производство и создание системы на напряжение 10 кВ, 40 МВА передаваемой мощности на основе высокотемпературной сверхпроводимости в составе ограничителя тока и кабеля (рис. 17).

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 г. 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 г. кабель был проложен и прошел испытания после прокладки. Успешная реализация данного проекта поможет накоплению опыта и послужит катализатором для дальнейшего продолжения сверхпроводящих технологий в энергетику.

КОНСТРУКЦИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КАБЕЛЯ:



1 – вход жидкого азота; 2 – изоляция кабеля; 3 – выход жидкого азота; 4 – формирователь; 5–7 фазы кабеля; 8 – экран; 9 – криостат

Рис. 17

B1-304. ALBERTINI M., BAREGGI A., CAIMI L., CHINOSI S., CRISCI V., FRANCHI BONONI S., GUALANO A., GUIZZO L., PEREGO G., POZZATI G. (ИТАЛИЯ). «РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ 150 КВ КАБЕЛЯ, ПРОИЗВЕДЕННОГО ПО ВЫСОКОИННОВАЦИОННОЙ P-LASER-ТЕХНОЛОГИИ»

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, начиная с 2009 г., в эксплуатации находится 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^2 (рис. 18). Образцы прошли приемо-сдаточные 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_0 при циклическом нагреве до 100–110 °C с общим числом циклов 80. После циклических испытаний образец подвергался импульсным воздействиям по ступенчатой методике и выдержал испытания амплитудой вплоть до 1300 кВ. Далее образец испытывался переменным напряжением при циклическом нагреве и выдержал без пробоя воздействие 375 кВ. Обращает на себя внимание, что испытание изоляции на тепловую деформацию было 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 предквалификационные 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.

B1-305. MIMURA T., HONJO S., MASUDA T., MACHIDA A., HARA T. (ЯПОНИЯ). «ПЕРВАЯ В ЯПОНИИ РАБОТАЮЩАЯ В СЕТИ 66 КВ 220 МВА СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ КАБЕЛЬНАЯ СИСТЕМА»

Кабель длиной 240 м на основе высокотемпературной сверхпроводимости был установлен на подстанции компании Tokyo Electric Power в Йокогаме (рис. 19). В 2011 г. были собраны системы охлаждения, и после успешных испытаний в октябре 2012 г. кабель подключили 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

ВНЕШНИЙ ВИД КАБЕЛЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ P-LASER

Рис. 18

ВНЕШНИЙ ВИД КАБЕЛЯ 66 КВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ, ПРОЛОЖЕННОГО В ЙОКОГАМЕ (ЯПОНИЯ)

Рис. 18

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.

B1-306. HATLO M. M., BREMNES J. J. (НОРВЕГИЯ). «ЗАВИСИМОСТЬ ПОТЕРЬ В БРОНЕ ОТ ТОКА В ТРЕХЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЯХ: СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА И РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ»

Увеличение передаваемых мощностей по кабелям, а также более высокие уровни напряжения привели в последнее время к существенному возрастанию размеров подводных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Увеличение глубин прокладки ведет к усилению защитных покровов, в том числе и проволочной брони. При эксплуатации 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 была разработана 2,5D-модель на основе конечно-элементного анализа. С ее помощью были рассчитаны две 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 результаты, завышенные на 20–30%.

Для базовой конструкции 2 с 85-ю 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.

B1-307. ILDSTAD E., HELLESO S.M., HVIDSTEN S., FAREMO H. (НОРВЕГИЯ), EGROT P. (ФРАНЦИЯ), BOSTRÖM J.-O. (ШВЕЦИЯ), NILSSON S., EEK J., MATALLANA J., WOLNEBERG H.M. (НОРВЕГИЯ). «РАЗВИТИЕ ВОДНЫХ ТРИИНГОВ (ВЛАЖНОЕ СТАРЕНИЕ) ИЗОЛЯЦИИ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПОД КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ»

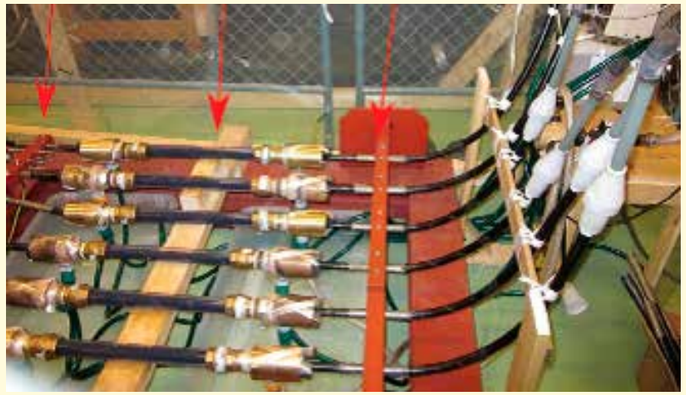
В докладе представлены результаты лабораторных испытаний и исследований образцов, изготовленных из кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ с сечением жилы 95 мм^2. Цель исследований – изучение влияния механических нагрузок на стойкость полимерной изоляции к влажному электрохимическому старению (росту и развитию водных триингов). Ак-

туальность исследований обусловлена ростом количества подводных кабелей, которые при 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 (3Uo) частотой 50 и 500 Гц. Испытательная установка представлена на рис. 20. Длительность испытаний составила один год.

По результатам испытаний были 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.

ВНЕШНИЙ ВИД ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ К ВОДНЫМ ТРИИНГАМ:



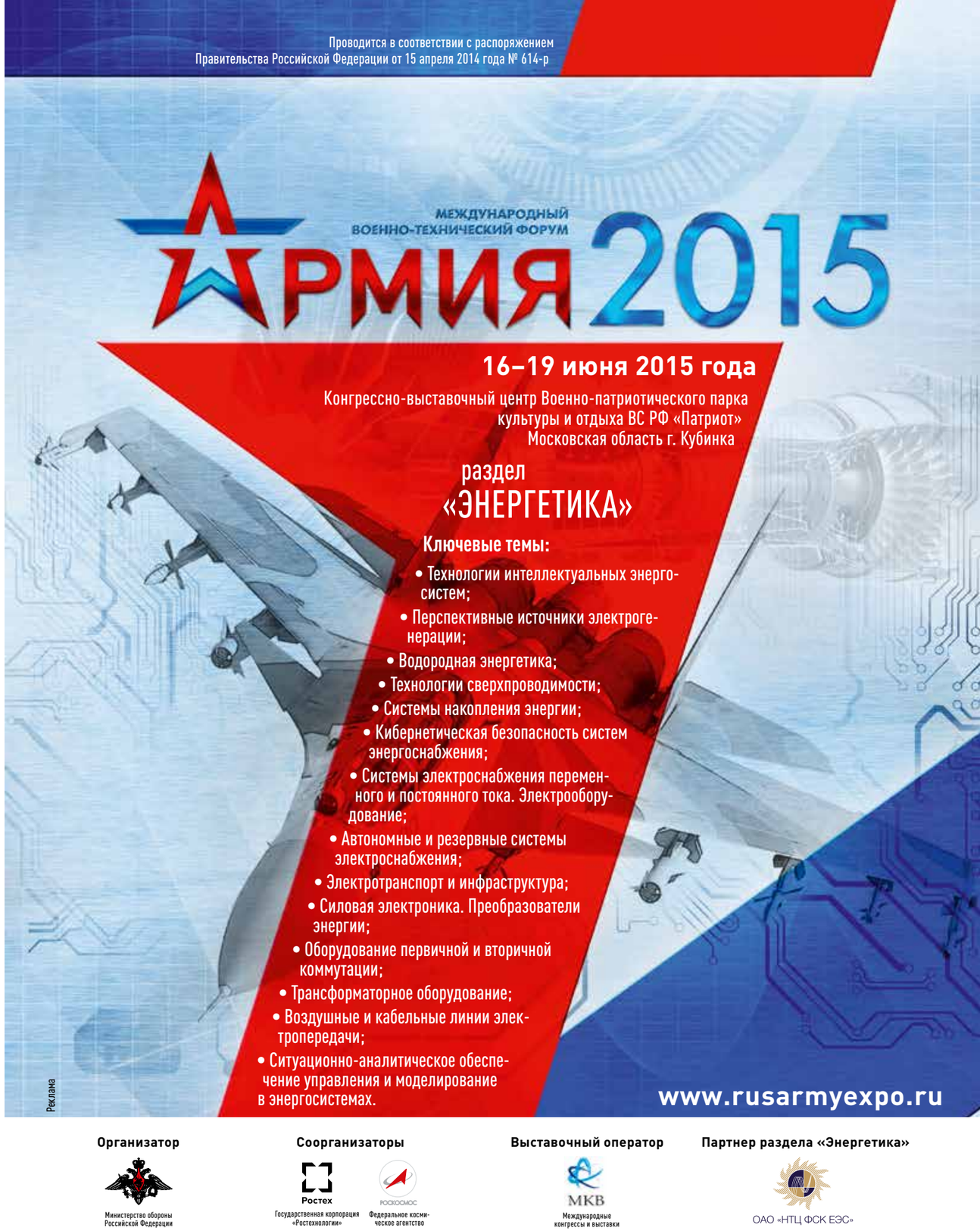
1 – механический зажим на подвижном конце; 2 – образец в трубе с водой; 3 – механический зажим на неподвижном конце; 4 – концевые муфты

Рис. 20

B1-308. LEE T.H., LEE S. B., NAM J. H., KIM Y. H., LEE S. K., LEE I. H., JEON S. I., WON Y. J., KIM J. S., LEE J. H. (КОРЕЯ). «ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ КАБЕЛЯ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА ПОСТОЯННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ В КОРЕЕ»

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^2. Дальнейшие испытания проводились на полномасштабных образцах. Кабель на напряжение ±80 кВ прошел комплекс испытаний в соответствии с рекомендациями ТВ 219. Коммерческое использование данной конструкции началось в апреле 2013 г. в проекте линии на остров Jeju. Кабельные системы ±250 кВ были также испытаны для использования в схемах с LCC- и VSC-конверторами в соответствии с рекомендациями СИГРЕ ТБ 496. Испытания кабельной системы на напряжение ±320 kV планируется провести по аналогичной программе. Все испытания выполнены в соответствии с рекомендациями СИГРЭ ТБ 496 в первой половине 2014 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

- активно развивается направление, занимающееся разработкой подводных кабелей, особенно тех, которые обеспечивают передачу электроэнергии от возобновляемых источников (ветрогенераторы, морские платформы);
- продолжается поиск и разработка дополнительных методов испытаний, позволяющих обеспечивать максимальную надежность кабельных линий;
- значительно возрос интерес к отдельным элементам арматуры кабельных систем (ограничителям перенапряжений, заземлителям, соединителям и др.), разрабатываются методы их испытаний;
- продолжаются работы по созданию новых кабельных материалов.