

4. Действующие стандарты и методики не могут быть использованы как универсальные документы для выключателей с различными дугогасящими средами. Необходимо разработать технические требования к вакуумным выключателям и соответствующую методику проверки их основных характеристик.

5. Для определения области применения разных типов выключателей, в том числе выключателей с синтетическими дугогасящими средами, следует провести комплексные исследования схем с различными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назарычев А. Н. Анализ основных преимуществ применения вакуумных выключателей // Энергоэксперт. 2007. № 4 – 5.
2. Кудрявцев А. А. Исследование аварийности в сетях 6 – 10 кВ горно-металлургических предприятий // Новости электротехники. 2009. № 6 (60).
3. Гуль А. Сравнение коммутационных перенапряжений выключателей СН, основанное на испытаниях в лабораторных

условиях и промышленных сетях // Мат-лы V междунар. конф. ТРАВЭК «Высоковольтное коммутационное оборудование». 2009 г.

4. Дяттерёв И. Л. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, сопровождающих коммутации вакуумных выключателей: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Новосибирск, 2006.

5. Лавров Ю. А. Кабели 6 – 35 кВ с пластмассовой изоляцией. Особенности проектирования и эксплуатации // Новости электротехники. 2007. № 1 (43).

6. Емельянов А. А., Емельянова Е. А. Импульсные технологии повышения электрической прочности в вакууме. — М.: Физматлит, 2009. — 160 с.

7. Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Лаптев О. И. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: монография. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. — 343 с.

8. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. — 264 с.

ляции кабеля одинаково. Она не восстанавливает свои свойства после повреждения и «заплавания» канала пробоя не происходит, что наблюдается в кабелях с БПИ в 60 – 70 % случаев. По опыту эксплуатации замыкание на землю в кабелях с пластмассовой изоляцией за время до 1 мин может переходить в устойчивую фазу с термическим разложением полимера и вероятным развитием аварийной ситуации. Также известно, что переход однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в многофазное возможен даже при пофазной раскладке кабелей в плоскости.

Это утверждение иллюстрирует рис. 1, где показан повреждённый таким образом кабель напряжением 35 кВ с изоляцией СПЭ. Длительность ОЗЗ в сети до перехода его в двухфазное КЗ составила 38 с. Следовательно, в сетях с кабелями, имеющими полимерную изоляцию, целесообразно организовывать релейную защиту (РЗ) от ОЗЗ с действием на отключение. С этим тезисом связана задача правильного выбора номинального напряжения кабеля $U_{ном}$.

Поскольку на этапе проектирования $U_{ном}$ кабелей с полимерной изоляцией обычно принимается равным номинальному напряжению сети, необходимо учесть следующее: согласно МЭК 60502-2 [2] эта сеть относится к категории «А» или «В», поэтому длительность существования режима ОЗЗ должна быть ограничена (для сетей категории «А» — 1 мин, категории «В» по МЭК 60183 [3] — 1 ч, но с условием, что суммарная продолжительность ОЗЗ за год не должна превышать 125 ч).

Таким образом, в целях минимизации повреждения кабельной изоляции в любом случае ОЗЗ должно отключаться как можно быстрее. Для этого рекомендуются в нейтраль сети 6 – 35 кВ включать резисторы и обеспечивать резервирование потребителей, например с помощью быстродействующего АВР со временем срабатывания до 100 мс. Такое решение технически обосновано, поскольку в российских сетях 70 – 75 % устойчивых и неотключённых ОЗЗ переходят в многофазные КЗ.

Помимо выбора $U_{ном}$ очень важно учитывать вероятный перегрев кабеля и повреждение изоляции вследствие ненормированного нагрева его экрана из-за протекания по нему наведённых токов, сопоставимых с рабочим током жилы. Эта проблема для конкретной КЛ легко решается после расчётного обоснования путём одностороннего разземления экранов или их транспозиции [4].

Однако ни в одном отечественном стандарте по кабелям с изоляцией СПЭ решение этой задачи нормативно не закреплено, и во исполнение не всегда применимых для нового оборудования требований ПУЭ «оболочка кабеля заземляется с двух сторон». Результаты такого непродуманного следования требованиям нормативных документов, а также сопутствующих ошибок проекта и монтажа были убедительно продемонстрированы на примере опыта эксплуатации кабеля с изоляцией СПЭ в системе электроснаб-

Технология эксплуатации и критерии отбраковки кабелей среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена

ШИРКОВЕЦ А. И., инженер, ООО «Болид»
nio_bolid@ngs.ru

Представлен обзор современной нормативной документации по разработке, сооружению и эксплуатации кабельных линий (КЛ) на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) на напряжение 6 – 35 кВ, обоснованы оптимальные нормы их испытаний повышенным напряжением сверхнизкой и промышленной частоты. В рамках создания технологии эксплуатации проанализированы наиболее информативные методы неразрушающего контроля КЛ, выполненных кабелем с полимерной изоляцией, в том числе измерение частичных разрядов (ЧР) и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$. Практическую ценность представляют предложенные числовые показатели критериев отбраковки КЛ в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена, нормативная документация, технология эксплуатации, напряжение сверхнизкой частоты (СНЧ), неразрушающий контроль, критерии отбраковки.

Сегодня на рынке электротехнической продукции кабели с изоляцией СПЭ (как отечественного, так и зарубежного производства) пользуются наибольшим спросом. Это связано главным образом с нормативным требованием, введённым в положения о технической политике ряда сетевых предприятий (например, ОАО ФСК ЕЭС [1, п. 2.2.3]), о необходимости применения новых видов оборудования, в том числе кабелей с полимерной изоляцией.

Тем не менее примерно половина выпускаемых некоторыми российскими заводами кабелей среднего напряжения (КСН) — это кабели с «классической» бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ). Ситуация закономерна, поскольку кабели

с БПИ эксплуатируются уже десятки лет и технология их эксплуатации известна и привычна. К тому же применение кабелей с полимерной изоляцией не всегда технически оправдано.

К твёрдой кабельной изоляции, активно применяемой в настоящее время для КСН, относится не только сшитый полиэтилен, но и этилен-пропиленовая резина (ЭПР). Процессы старения изоляции ЭПР и СПЭ принципиально подобны, хотя диэлектрические потери в ЭПР примерно на порядок выше: при 20 °С параметр $\tan \delta_{ЭПР} = (2 \div 4) \cdot 10^{-3}$, в то время как в СПЭ $\tan \delta_{СПЭ} = (4 \div 8) \cdot 10^{-4}$ и снижается до $(1,5 \div 2,0) \cdot 10^{-5}$ при нагреве до 95 °С.

При электрическом пробое «поведение» любой монолитной полимерной изо-



Рис. 1. Повреждение кабеля с изоляцией СПЭ в сети 35 кВ вследствие развития ОЗЗ и его перехода в двухфазное КЗ

жения 35 кВ печной установки [5]: за 1,5 года эксплуатации на шести КЛ длиной по 1200 м каждая в ходе периодических ремонтов с восстановлением пробитого кабеля было установлено дополнительно более 10 муфт.

Вопросы правильного выбора параметров КЛ, прокладки и монтажа кабеля и кабельной арматуры, нормативов испытаний, методик технических обследований, защиты от перенапряжений и в целом разработки технологии эксплуатации КЛ с новыми видами изоляции должны быть решены в рамках общероссийских нормативно-технических документов (НТД).

Обзор нормативной документации по кабелям с изоляцией СПЭ

За рубежом вопросы стандартизации условий производства, методов выбора и норм испытаний повышенным напряжением уже решены в рамках стандартов МЭК, CENELEC, IEEE [2, 6, 7] и отраслевых НТД. Российским производителям кабеля с изоляцией СПЭ на среднее напряжение, а также проектным и эксплуатирующим организациям приходится ждать планируемого к выпуску ещё в 2008 г. ГОСТ Р «Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на напряжение 6, 10, 20 и 35 кВ. Технические условия».

В целях создания лучших условий для продвижения кабельной продукции на рынок крупными кабельными заводами, в частности в составе ассоциации «Электрокабель», выпускаются различные технические инструкции по прокладке, монтажу, испытаниям кабелей с изоляцией СПЭ, из которых наиболее насыщен необходимой информацией методический материал [8], выпущенный заводом «Южккабель». Подавляющее большинство таких инструкций не содержит специальных требований к выбору специфических параметров кабелей с изоляцией СПЭ — сечения и способа заземления экранов, номинального напряжения, «жёстко» связанного с допустимой длительностью ОЗЗ в конкретной сети, и пр.

Такое положение вполне оправдано, поскольку все параметры КЛ должны быть выбраны уже на этапе проектирования. Заводу же необходимо изготавливать и продавать кабель, испытанный на

соответствие существующим НТД, с заданными заказчиком характеристиками. Создавшуюся ситуацию, когда предприятия-изготовители из-за отсутствия общенациональных стандартов вынуждены своими силами разрабатывать рекомендации по сооружению и эксплуатации КЛ на основе кабелей с изоляцией СПЭ, нельзя считать нормальной.

Объективное заключение по качеству кабельной продукции конкретного производителя можно сделать только на основе опыта эксплуатации. Однако априори считается, что импортный кабель лучше российского. Это мнение ошибочно. Всем российским кабельным заводам при производстве, а также типовых и ресурсных испытаниях КСН с изоляцией СПЭ (по крайней мере, что касается технологии пероксидной сшивки) приходится следовать адаптированным и в ряде случаев даже ужесточённым требованиям международных и европейских стандартов, изложенным в разработанных ВНИИКП технических условиях (ТУ) [9, 10].

Например, согласно стандарту HD 620 [6] для КСН линейные размеры выступов электропроводящего экрана не должны превышать 100 мкм, а полостей и инородных включений в изоляции — 180 мкм. По техническим условиям [9] соответствующие допустимые размеры составляют 80 и 200 мкм. Все выпускаемые типы кабелей с изоляцией СПЭ среднего напряжения должны проходить длительные испытания на подтверждение ресурса (старение 2 года или 17 500 ч во влажной среде, приложенное напряжение промышленной частоты $3U_0$, температура 40 ± 5 °С). По данным параметрам отечественные нормы полностью соответствуют европейским, поэтому, приобретая кабель напряжением 6 – 35 кВ с изоляцией СПЭ, заказчик (чтобы удостовериться в его качестве) может запросить у завода-изготовителя протоколы результатов испытаний конкретного типа кабеля на ускоренное «влажное» старение.

Интересен тот факт, что и российские заводы, которые выпускают кабели напряжением 6 – 10 кВ по силановой технологии («Камкабель», «Севкабель», «Кавказкабель»), и финская компания «Prysmian Cables & Systems» могут производить их также по пероксидной технологии. Из-

вестно, что фирма Maileffer (Финляндия) к настоящему времени поставила 20 технологических линий, работающих по технологии силановой сшивки в Великобритании (компания BICC), Нидерландах (NKT Cables), Швейцарии (Kabelwerk Studer) и пр.

Существует мнение, что срок службы «силанольно-сшитых» кабелей не превышает 10 лет. Однако, по заключению специалистов ВНИИКП, основанному на результатах сравнительных испытаний, которые были проведены в 2003 – 2006 гг., «технические характеристики кабелей, произведённых по технологии силанольной сшивки, не ниже аналогичных характеристик кабелей, изготовленных по технологии пероксидной сшивки». В связи с этим заказчик вправе требовать от любого производителя информацию о технологии сшивки закупаемых кабелей.

Технические условия, разработанные ВНИИКП (а также отдельные ТУ завода «АВВ Москабель»), при должном отношении производителя к «чистоте» технологии почти со 100 %-ной вероятностью гарантируют высокое качество и надёжность предлагаемых марок кабелей. Тем не менее существуют объективные факторы, на которые при эксплуатации повлиять уже невозможно — наличие включений в изоляции и микродефекты элементов кабеля, снижающие его электрическую прочность относительно расчётного значения.

Для качественного КСН исходная длительная электрическая прочность составляет 30 – 35 кВ/мм, что сопоставимо с длительной прочностью образцов электротехнического фарфора и закалённого стекла в однородном поле, которая достигает 45 кВ/мм. Для кабелей высокого напряжения длительная прочность, составляющая 50 – 70 кВ/мм, превышает прочность межэлектродных промежутков в вакуумных дугогасительных камерах современных коммутационных аппаратов при расстояниях между главными контактами до 10 мм и абсолютном давлении 10^{-5} Па.

Импульсная пробивная прочность изоляции СПЭ для кабеля напряжением 10 кВ составляет в среднем 400 – 450 кВ, что в 1,5 – 3,0 раза выше импульсной прочности трансформаторного масла. Влияние на электрическую прочность изоляции КСН особенностей физической структуры СПЭ и внутренних механических напряжений в ней незначительно, хотя для кабелей 110 кВ и выше эти факторы могут снижать прочность на 20 – 25 %.

В российской электроэнергетике нормативное обеспечение контроля состояния КСН в условиях эксплуатации не отличается особым разнообразием. К наиболее удачным внутренним документам предприятий в форме методических указаний и рекомендаций, где уже содержатся диагностические и испытательные нормы и критерии, можно отнести стандарты [11, 12, 13].

В 2009 г. ОАО ФСК ЕЭС введён в действие стандарт на кабели с изоляцией СПЭ [14] (по сути недостаточна проработанная компиляция ряда публикаций и

НТД), применение которого на практике крайне осложнено. Это было подтверждено опытом выбора режима заземления нейтрали олимпийских объектов г. Сочи, в частности в схеме электроснабжения 10 кВ горнолыжного комплекса «Роза Хутор».

Ситуация с нормативным обеспечением пожаро- и взрывобезопасности КСН несколько лучше: в 2009 г. введён в действие ГОСТ [15], а в техническом циркуляре [16] чётко обозначены условия применения кабелей с изоляцией СПЭ в особых условиях. В частности, в целях дополнения и уточнения требований ПУЭ определено, что кабели с изоляцией СПЭ, не распространяющие горение при групповой прокладке (исполнения нГ, нГ-LS, нГ-НГ), разрешено использовать в кабельных сооружениях, в том числе в пожаро- и взрывоопасных зонах всех классов.

Следует отметить, что кабели исполнения нГ, нГ-LS не поддерживают горение только в случае отсутствия тока подпитки дуги, например, тока замыкания на землю. Полимерная оболочка таких кабелей содержит антипирены, но сам сшитый полиэтилен химически разлагается, теряет форму и выгорает при воздействии температур выше 300 – 350 °С. Это заключение подтверждено лабораторными испытаниями образцов СПЭ.

В настоящее время ОАО «МРСК Сибири» готовит к выпуску стандарт организации «Методические указания по выбору, прокладке, монтажу и эксплуатации силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6 – 110 кВ», который планируется ввести в действие в 2011 – 2012 гг. Документ призван обобщить и систематизировать требования существующих НТД на всех этапах применения кабелей с изоляцией СПЭ: от приёмки кабеля на барабанах до выбора методики и критериев его контроля и отбраковки в течение всего срока эксплуатации.

Нормы и методы испытаний кабелей с изоляцией СПЭ повышенным напряжением

Сегодня убедительно доказано, что применяемая в соответствии с РД [17] система плано-профилактических испытаний КЛ, при которой изоляция кабелей и муфт испытывается постоянным напряжением $(4 - 6)U_{ном}$, не пригодна для испытаний КЛ на основе кабелей с изоляцией СПЭ. Но и в стандарте МЭК [2] (п. 20.2.2) допускается испытание КЛ постоянным напряжением $4U_0$ в течение 15 мин. К сожалению, такая практика наблюдается в эксплуатации повсеместно.

Например, на предприятиях концерна «Белэнерго» по согласованию с российской ассоциацией «Электрокабель» КЛ с полимерной изоляцией испытываются выпрямленным напряжением $4U_{ном}$. При этом в инструкциях производителей кабеля с изоляцией СПЭ отсутствует ссылка на примечание 1 к п. 20.2.2 стандарта МЭК [2]: «испытание напряжением постоянно-го тока может повредить испытываемую систему изоляции».

По результатам тщательного анализа более 15 отечественных и зарубежных НТД (в том числе [2, 6, 7, 11 – 13], инструкций заводов-изготовителей, ТУ [9, 10] и пр.) для КЛ с полимерной изоляцией напряжением 6 – 35 кВ можно рекомендовать следующее:

- рассматривать возможность испытания кабеля напряжением СНЧ и только при её отсутствии применять альтернативный вариант — испытание напряжением с частотой 50 Гц. Известно, что развитие канала пробоя при частоте приложенного напряжения 50 Гц происходит со средней скоростью 1,7 мм/ч; при частоте 0,1 Гц напряжения косинусно-прямоугольной формы — 7,8 мм/ч; при частоте 0,1 Гц напряжения синусоидальной формы — 12,3 мм/ч;

- выбирать напряжение испытания СНЧ в зависимости от местных производственных условий — $3U_0$ или $3U_{ном}$. При напряжении $3U_{ном}$ время испытания — 15 мин, при $3U_0$ — от 30 до 60 мин с эмпирической вероятностью выявления дефектов 0,9 (в случае 30-минутной длительности) и 1,0 (60-минутной) [18];

- проводить испытания напряжением промышленной частоты с приложением $U_{исп} = U_{ном}$ в течение 5 мин (по согласованию с заводом-изготовителем допускается $2U_0$ в течение 30 мин) или $U_{исп} = U_0$ в течение 24 ч;

- категорически исключить испытания КЛ с изоляцией СПЭ напряжением постоянного тока. Это связано с накоплением объёмных зарядов в приэлектродных областях и возле микродефектов в полимере. По этой же причине следует запретить прожиг изоляции СПЭ постоянным током для снижения переходного сопротивления при поиске места повреждения на КЛ.

Исходя из тенденции постепенного введения в практику эксплуатации диагностических обследований, срок между испытаниями КЛ с полимерной изоляцией может быть увеличен до 3 – 4 лет, что должно быть отражено в НТД эксплуатирующей организации. Адекватная альтернатива — полное исключение испытаний повышенным напряжением в межремонтный период.

Критерии оценки результатов неразрушающего контроля КЛ

Для получения более или менее объективной информации о текущей степени старения изоляции, а также выявления предаварийных состояний КЛ в эксплуатации наиболее информативными представляются следующие методы:

- измерение сопротивления изоляции кабеля;

- измерение $tg \delta$ на СНЧ либо изотермического тока релаксации (по заключению об интегральном состоянии изоляции аналогичен методу измерения $tg \delta$);

- измерение уровня и мест локализации частичных разрядов (ЧР) в КЛ;

- импульсная рефлектометрия;

- тепловизионный контроль элементов КЛ.

Рассмотрим более подробно первые три метода неразрушающего контроля. Для первичной оценки состояния изоляции КЛ 6 – 35 кВ, в том числе при приёмке кабеля, не следует пренебрегать таким простым методом, как измерение сопротивления изоляции $R_{из}$ между фазами и между каждой фазой и «землёй» посредством мегаомметра на 2,5 кВ. В эксплуатации контроль $R_{из}$ производится на отсоединённом с обоих концов кабеле в целях выявления грубых нарушений целостности изоляции и развившихся местных дефектов (заземление жил, КЗ между фазами и пр.). Относительное отличие $R_{из}$ по разным фазам КЛ не должно превышать $\pm 10 \%$.

Состояние изоляции считается нормальным, если $R_{из} \geq 200$ МОм для нового кабеля и $R_{из} \geq 100$ МОм для эксплуатируемого. Оценка состояния КЛ на основе кабелей с изоляцией СПЭ проводится также по коэффициенту абсорбции $K_a = R_{60c} / R_{15c}$ (где R_{15c} , R_{60c} — сопротивления изоляции, измеренные через соответственно 15 и 60 с после начала заряда кабеля постоянным напряжением) согласно представленной далее классификации [12]:

Состояние кабеля	Коэффициент абсорбции
Норма	Более 1,6
Работоспособное с незначительными отклонениями	$1,6 \geq K_a \geq 1,4$
Работоспособное со значительными отклонениями	$1,4 > K_a \geq 1,25$
Ухудшенное	$1,25 > K_a \geq 1,0$
Предаварийное	Менее 1,0

Хотя значение сопротивления изоляции силовых КЛ напряжением выше 1 кВ не нормируется, эти измерения позволяют удостовериться, что кабель не содержит серьёзных дефектов перед испытанием высоким напряжением или перед подачей питания. Например, в сети 6 кВ крупного горнообогатительного комбината принято следующее: высоковольтным испытаниям подвергаются только КЛ после ремонтов и КЛ, срок эксплуатации которых не превышает 15 – 20 лет. В прочих КЛ измеряется $R_{из}$ и, если оно меньше 100 МОм, осуществляется прожиг дефектного кабеля. В приведённом случае речь идет о кабелях с БПИ, однако внимания заслуживает факт щадящего контроля их состояния.

Метод измерения $tg \delta$ применяется для определения степени старения изоляции КЛ независимо от класса напряжения. Анализ значения $tg \delta$ на различных уровнях приложенного напряжения позволяет оценить «интегральную» степень старения изоляции всей КЛ без определения ослабленных участков по её длине. При этом фактор старения, выраженный в изменении структуры изоляции и развитии ЧР на микродефектах, не может быть локализован.

На практике оценивают не только значения $tg \delta$ на частоте 0,1 Гц для ряда напряжений $(0,5 - 2,5)U_0$ с шагом $0,5U_0$, но и определяют приращение $tg \delta$, в частности при значениях U_0 и $2U_0$. Поскольку

Таблица 1

Классификация состояния кабеля	Степень старения изоляции	Критерий оценки состояния кабеля		Мероприятия по результатам измерения
		$Q = \operatorname{tg} \delta(2U_0)$	$G = \operatorname{tg} \delta(2U_0) - \operatorname{tg} \delta(U_0)$	
Работоспособное (норма)	Наличие отдельных областей старения	Менее $1,2 \cdot 10^{-3}$	Менее $0,1 \cdot 10^{-3}$	Для локализации «слабых» областей старения изоляции по трассе кабеля рекомендуется провести испытание повышенным напряжением СНЧ и измерение ЧР. Кабель остаётся в эксплуатации, назначается срок следующего обследования
Ухудшенное	Высокая или локальное повреждение изоляции	$1,2 \cdot 10^{-3} < Q \leq 2,2 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3} < G \leq 0,6 \cdot 10^{-3}$	Для локализации повреждений по трассе кабеля следует провести испытание повышенным напряжением СНЧ и измерение ЧР. После ремонта и устранения дефектов кабель остаётся в эксплуатации
Пред-аварийное	Предельная	Более $2,2 \cdot 10^{-3}$	Более $0,6 \cdot 10^{-3}$	Изоляция кабеля сильно повреждена, кабель выводится из эксплуатации

$\operatorname{tg} \delta$ не зависит от приложенного к изоляции напряжения, по его изменению на интервале $U_0 - 2U_0$ судят о наличии газовых включений в изоляции кабеля. Для корректного анализа состояния линии результаты измерения $\operatorname{tg} \delta$ следует сравнивать по фазам.

Критерии оценки состояния КСН с изоляцией СПЭ по уровню $\operatorname{tg} \delta$ на основе исследований [19] приведены в табл. 1. Состояние изоляции определяют согласно трёхуровневой классификации, используемой компанией «Westinghouse Electric» (США). Для анализа $\operatorname{tg} \delta$ следует выполнить условие: 1 % соответствует абсолютному значению $\operatorname{tg} \delta = 10^{-2}$.

Метод измерения ЧР применяется для определения степени повреждения изоляции КЛ частичными разрядами независимо от класса напряжения. Нормативное обоснование метода изложено в ГОСТ [20]. В процессе эксплуатации метод измерения ЧР, применяемый с рекомендуемой периодичностью 1 – 2 года, способствует определению местоположения дефектов в изоляции строительных длин кабелей и своевременному выявлению предаварийного состояния муфт.

В связи с отсутствием статистической информации по уровням ЧР в различных элементах КЛ и соответствующей степени деградации изоляции СПЭ достоверное заключение по результатам анализа ЧР может быть сделано только для конкретных КЛ после оценки тенденции изменения локальных концентраций и уровней ЧР. Для этого, как правило, назначается повторное тестирование не позже, чем через год. Однако для оценки состояния изоляции КЛ по уровню ЧР «в первом приближении» можно использовать нормированные значения, полученные ООО «Тест» (г. Пермь) в результате 10-летних испытаний [21].

Согласно предложенным критериям, если напряжение возникновения ЧР составляет $U_i \leq 5, 10, 20$ кВ для кабелей с номинальным напряжением 10, 20, 35 кВ соответственно, КЛ должна быть выведена из эксплуатации. Важный параметр — зафиксированное число ЧР. Критическая интенсивность ЧР констатируется при числе ЧР, равном $0,23 \div 0,7$ с⁻¹ независимо от номинального напряжения КЛ. При

этом для классификации состояния изоляции по пятиуровневой системе, рекомендованной в методических указаниях [12], удобно пользоваться алгоритмом, представленным на рис. 2.

При зарегистрированном кажущемся заряде ЧР $q \leq 1200$ пКл состояние изоляции оценивается как нормальное и повторное измерение уровней ЧР назначается через 5 лет, а при $q \geq 10\,500$ пКл констатируется «предаварийное» состояние изоляции элемента КЛ, и она подлежит выводу из эксплуатации. Для сравнения: в нормах заводских испытаний на строительных длинах КСН допускается максимальный уровень ЧР не более 10 и 5 пКл согласно документам [2, 9] и [6] соответственно.

Анализ мест повышенной концентрации ЧР при эксплуатации подтверждает, что на КЛ с полимерной изоляцией такими местами в большинстве случаев являются соединительные и концевые муфты. Это связано с неизбежным «улучшением» условий для развития ЧР в процессе установки любой муфты, особенно при ошибках монтажа. Следует отметить, что для

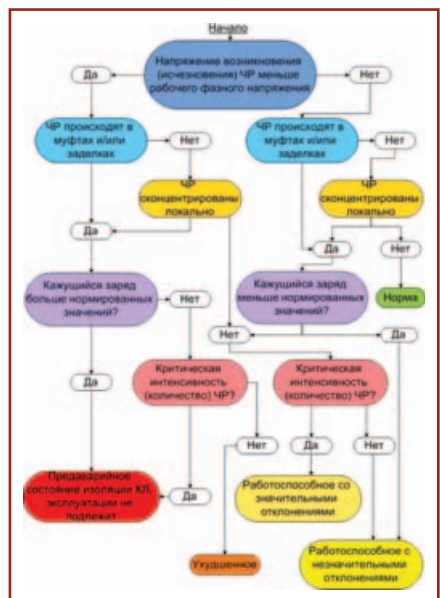


Рис. 2. Алгоритм оценки состояния полимерной изоляции КЛ на основе измерения параметров ЧР

КЛ напряжением 110 кВ максимальная концентрация ЧР всегда наблюдается в муфтах.

Независимо от класса напряжения КЛ нарушение технологии монтажа катодострофически влияет на остаточный ресурс всей линии. Поэтому аварийные повреждения арматуры КЛ и прилегающих участков кабеля с изоляцией СПЭ по причине электрического пробоя регистрируются гораздо чаще (до 90 % случаев при условии правильного выбора прочих параметров кабеля), чем это происходит в муфтах обычных кабелей с БПИ (13 % случаев).

Определение критериев отбраковки КЛ с полимерной изоляцией

Исходя из анализа нормированных значений коэффициента K_a ; сопротивления $R_{из}$; $\operatorname{tg} \delta$ и рабочей ёмкости кабеля; напряжения возникновения ЧР U_i ; локальных концентраций ЧР и ряда других параметров, логично заключить, что предельные их значения могут использоваться в качестве критериев отбраковки КЛ и для диагностирования предаварийных состояний изоляции в процессе эксплуатации (табл. 2). Кроме того, необходимо принимать в расчёт результаты визуального осмотра КЛ, её высоковольтных испытаний и тестирования рефлектометром.

Для формулировки достоверного заключения по техническому состоянию линии следует сопоставлять результаты измерений по разным фазам каждой линии и по однотипным КЛ в подобных условиях эксплуатации, а также оценивать «скорость» старения изоляции конкретной КЛ на основе «банка данных» измерений за несколько лет.

Решения по срокам эксплуатации КЛ до очередного обследования и необходимости выполнения ремонта (в соответствии с оценкой технического состояния по многоуровневой классификации) принимаются после тщательного анализа всех результатов испытаний, измерений и диагностирования, отражённых в технической документации на КЛ. Средняя рекомендуемая периодичность обследований КЛ составляет 1 – 2 года.

Выводы

1. При проектировании КЛ на основе кабелей с полимерной изоляцией необходимо учитывать особенности выбора сечения и способа заземления экранов, а также номинального напряжения, жёстко связанного с допустимой длительностью замыкания на землю в конкретной сети и пр. Требования и нормы по этим параметрам должны быть отражены в единых стандартах, например ГОСТ.

2. Для эксплуатационных организаций вопрос взаимосвязки требований ПУЭ, ПТЭ и РД [17] с рекомендациями НТД [2, 6, 7] в части норм и методов испытаний повышенным напряжением и технического диагностирования КСН с полимерной изоляцией до сих пор не решён. В связи с этим реализуется потребность в разработке соответствующих стандартов организаций, например, в ОАО «Газ-

Элемент КЛ	Критерий отбраковки	Значение критерия, определяющее состояние элемента КЛ как «предаварийное»	
Контактные соединения, соединительные и концевые муфты и заделки, кабель на строительной длине, разделанные жилы кабеля	Коэффициент дефектности k_d для контактного соединения	Более 1,5	
	Избыточная температура $\Delta\theta_{0,5}$ при токе нагрузки $0,5I_{ном}$	Более 30 °С	
	Температура внешней поверхности кабеля в текущем режиме при токе нагрузки не менее $0,3I_{ном}$	Выраженные локальные перегревы, неравномерное распределение температуры по оболочке кабеля (разница более 3 – 5 °С) и по отношению к другим фазам (разница более 10 °С)	
Изоляция экрана кабеля (полимерная оболочка)	Проколы, глубокие царапины и сквозные отверстия	Многочесные повреждения оболочки	
	Сопротивление оболочки	Значения, свидетельствующие о нарушении целостности оболочки по отношению к «земле» (от 0 до единиц Мом)	
Изоляция жил кабеля	Сопротивление $R_{из}$ при соответствующем K_a	$K_a \leq 1,25$	$R_{из} \leq 5$ МОм
		$K_a \leq 1,0$	$R_{из} \leq 10$ МОм
	$tg \delta$	$Q = tg \delta(2U_0)$	Более $2,2 \cdot 10^{-3}$
		$G = [tg \delta(2U_0) - tg \delta(U_0)]$	Более $0,6 \cdot 10^{-3}$
	Рабочая ёмкость кабеля, приведённая к удельному значению на 1 м длины (только для КЛ 20 и 35 кВ)	Отличие по разным фазам	Более 5 – 10 %
		Расхождение с результатами заводских испытаний	Более 5 %
	Максимальное значение ЧР в локальном месте q		Более 10 500 пКл
	Амплитудное значение напряжения возникновения ЧР U_i для кабелей разного напряжения	6 кВ	Менее 3,2 кВ
		10 кВ	Менее 4,5 – 5,0 кВ
		20 кВ	Менее 10 кВ
35 кВ		Менее 20 кВ	
Внешний вид рефлектограммы и полярность отражённого сигнала		Свидетельствуют о КЗ, обрыве кабеля или замыкании фазы на землю (экран) при переходном сопротивлении 0 – 10 Ом	
Напряжение пробоя на частотах испытательного напряжения	0,1 Гц	Менее $U_{исп} = U_0$ или $2U_0$	
	50 Гц	Менее $U_{исп} = 3U_0$ или $3U_{ном}$	
Жила кабеля	Целостность жилы по всей длине кабеля	Обрыв	

пром», ОАО «МРСК Сибири», концерне «Росэнергоатом» и пр.

3. Для обеспечения нормативного срока эксплуатации КЛ с полимерной изоляцией, в том числе СПЭ, необходимо прорабатывать технологию их эксплуатации. В её рамках должны быть решены задачи организации приёмки в эксплуатацию кабелей и смонтированных КЛ, разработаны методики, нормы и периодичность технических обследований, а также критерии оценки состояния изоляции и отбраковки элементов КЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС», утверждённое Советом директоров 10.02.2011 / Электронный ресурс http://www.fsk-ees.ru/media/File/evolution_technology/techpolicy1.pdf, дата обращения 24.05.2011.
2. МЭК 60502-2:2005. Силовые кабели с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальные напряжения от 1 кВ ($U_{max} = 1,2$ кВ) до 30 кВ ($U_{max} = 36$ кВ).
3. МЭК 60183:1984. Руководство по выбору высоковольтных кабелей.
4. Дмитриев М. В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6 – 500 кВ. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 153 с.
5. Ильиных М. В., Сарин Л. И., Ширковец А. И. Анализ повреждений кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в сети 35 кВ металлургического завода // Всероссийская науч.-практ. конф. «Повышение надёжности эксплуатации электрических станций и энергетических

систем» — ЭНЕРГО-2010: Труды конф. Т. 2. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 101 – 103.

6. CENELEC HD 620. Распределительные кабели с экструдированной изоляцией на номинальные напряжения от 3,6/6 (7,2) кВ до 20,8/36 (42) кВ включительно.

7. IEEE 400.2. Руководящие указания по полевым испытаниям экранированных силовых кабельных систем с использованием напряжения сверхнизкой частоты.

8. РТМ К28-005–2007. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 35 кВ. Научно-методическое издание / Под ред. А. К. Шидловского, В. М. Золотарева. — Харьков: Майдан, 2007. — 62 с.

9. ТУ 16.К71-335–2004. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20, 35 кВ (с доп. № 1 от 2006 г.).

10. ТУ 16.К71-343–2004. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена, не распространяющие горение, на напряжение 6 – 10 кВ.

11. Методика по техническому диагностированию кабельных линий напряжением 6 и 10 кВ энергохозяйства ОАО «Газпром». — М.: ОАО «Газпром», 2007.

12. МУ 1.2.4.10.006.0014–2007. Методические указания по проведению испытаний повышенным напряжением и контролю технического состояния силовых кабельных линий на атомных стан-

циях / Утв. ФГУП концерна «Росэнергоатом» указанием № 14-ук от 15.02.2008.

13. Методика испытаний и неразрушающих методов диагностики силовых кабельных линий 6 – 110 кВ ОАО «МРСК Волги». — М.: ОАО «МРСК Волги», 2008.

14. СТО 56947007–29.060.20.020–2009. Методические указания по применению силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ и выше / Утв. ОАО «ФСК ЕЭС» распоряжением № 22р от 22.01.2009.

15. ГОСТ Р 53315–2009. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности.

16. Технический циркуляр «О применении кабелей из сшитого полиэтилена в кабельных сооружениях, в том числе во взрывоопасных зонах» / Утв. Ассоциацией «Росэлектромонтаж» распоряжением № 14/2006 от 16.10.2006.

17. РД 34.45-51.300–97. Объем и нормы испытаний электрооборудования.

18. Mon S. C. Very low Frequency Testing — Its Effectiveness in Detecting Hidden Defects in Cables // CIRED Barcelona. 2003. Session 1. Paper 8.

19. Bach R., Kalkner W., Oldehoff H. Verlustfaktormessungen bei 0.1 Hz an betriebsgealterten PE/VPE Kabelanlagen // Elektrizitätswirtschaft Jg92. 1993. Heft 17/18. P. 1076 – 1080.

20. ГОСТ 20074–83. Электрооборудование и электроустановки. Методы измерения характеристик частичных разрядов.

21. Вдовико В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. — Новосибирск: Наука, 2007. — 155 с.