

УДК 621.315.2.016.2

ФАКТОРЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ СШИТО-ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

И.Н. Кучерявая, докт. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина
rB.irinan@gmail.com

Приведены факторы и механизмы старения сшитого-полиэтиленовой изоляции силовых кабелей, мультифизические процессы и явления, которые сопровождают деградацию и приводят к пробоям изоляции. Представлены характерные дефекты изоляции, возникающие при производстве, проектировании, прокладке и эксплуатации кабелей. Проанализированы причины возникновения дефектов и повреждений изоляции. Показаны роль электрических режимов работы кабелей и преимущества использования неразрушающих методов их испытания для длительного срока службы изоляции. Библиография: 49, рис. 7, табл. 3.

Ключевые слова: сшитый-полиэтиленовая изоляция, силовые кабели, макро- и микроуровневые дефекты, факторы и механизмы старения изоляции, переходные процессы, высокочастотные перенапряжения, методы испытания.

Введение. Силовые кабели являются важным составляющим элементом систем передачи и распределения электроэнергии. На современном этапе к основным мировым тенденциям в области развития кабельной техники относятся широкое внедрение и преимущественное использование в электрических сетях силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) на высокое и сверхвысокое напряжения (до 500 кВ) [13, 20, 33, 35, 36]. Кабели с СПЭ изоляцией предпочтительны и перспективны не только при строительстве новых, но и реконструкции действующих кабельных линий, благодаря уникальным свойствам сшитого полиэтилена, современным конструкциям кабелей, их длительному сроку службы (до 30 лет), достаточно высокой надежности и экологической безопасности [13]. В работе [4] на основании технической обоснованности и экономической целесообразности применения кабелей на высокое напряжение делается вывод о том, что в сетях 110...500 кВ в обозримом будущем альтернативы однофазным кабелям с СПЭ изоляцией не предвидится.

Надежность силовых кабелей в процессе длительной эксплуатации определяется многими факторами, основными из которых являются качество и связанная с ним скорость старения изоляции, совершенство используемых материалов и технологического процесса изготовления, условия и режимы работы. По данным всемирно известной высоковольтной лаборатории КЕМА (Нидерланды) интенсивность отказов непосредственно кабелей с полиэтиленовой изоляцией составляет 18 % всех причин выхода из строя кабельных линий [2]. Аналогичная статистика (до 16,7 % отказов) представлена в [35] для кабелей на высокое и сверхвысокое напряжения с СПЭ изоляцией.

В связи с отмеченным актуальной представляется задача обеспечения высокой надежности силовых кабелей, в том числе путем детального изучения факторов, влияющих на повреждаемость, и причин, приводящих к выходу из строя кабелей.

СПЭ изоляция имеет трехэлементную структуру, состоит из основной полиэтиленовой изоляции и окружающих ее полупроводящих слоев (рис. 1 а). Полупроводящие слои по жиле и изоляции предназначены для выравнивания скачка напряженности электрического поля соответственно между жилой и изоляцией, между изоляцией и металлическим экраном. Установлено [20, 31, 35, 36, 47], что старение полиэтиленовой изоляции в условиях воздействия электрического поля обусловлено, прежде всего, низким качеством исходного материала, неоднородной структурой изоляции и дефектами в ней, образуемыми в процессе изготовления.

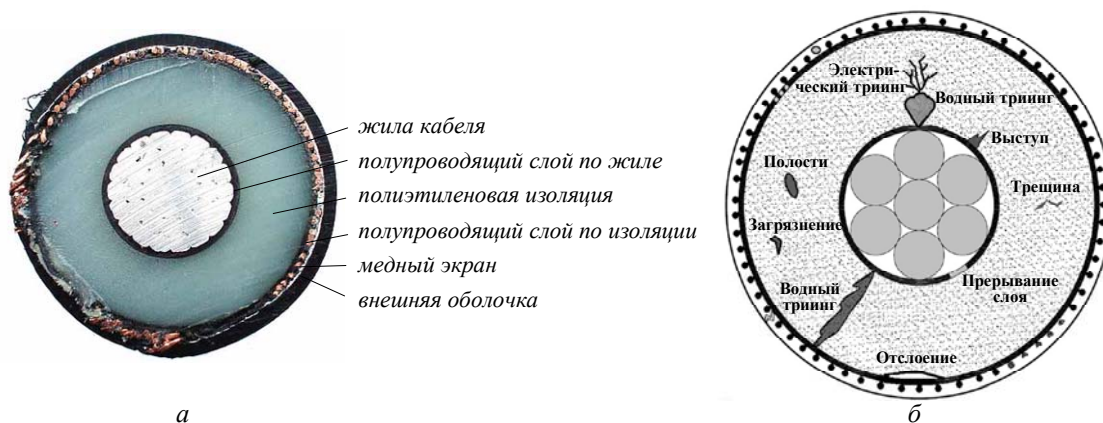


Рис. 1

Характерные дефекты СПЭ изоляции силовых кабелей показаны на рис. 1 б [36]. В ходе эксплуатации кабелей структурные дефекты способны развиваться. В местах их расположения при определенных значениях электрического поля возникают частичные разряды (ЧР), водные, а затем и электрические триинги, что относится к основным механизмам старения СПЭ изоляции [12, 30, 31, 47].

В. Bernstein в одном из первых обзоров по теории триингов [26] определяет два фундаментальные условия их развития в СПЭ изоляции – наличие полярной жидкости (обычно воды) и воздействие напряжения (особенно для электрических триингов). Среди остальных факторов, влияющих на распространение триингов, в [26] названы: время старения, природа материала, наличие загрязнений и примесей, температура, температурные градиенты, структура кабеля, значение рабочего напряжения, испытательная частота, антиоксиданты, стабилизатор напряжения, свойства воды, тип полупроводящих слоев.

Триинги в СПЭ изоляции опасны для кабеля вследствие своего участия в формировании канала пробоя и как причина снижения электрической прочности изоляции. Процесс развития электрического пробоя в изоляции сложен и тесно связан не только с распространением триинговых структур, но и с возникновением разрядов, а также внутренними электронными, электромеханическими и тепловыми процессами (рис. 2) [31, 47].

Состояние СПЭ изоляции зависит как от факторов старения, представленных в табл. 1 [29, 30], так и времени их воздействия, значений электрических, тепловых, механических характеристик. Характерные время и уровень электрического поля для различных механизмов пробоя СПЭ изоляции показаны на рис. 2 [47].

Факторы старения СПЭ изоляции согласно данным работы [29] подразделяются на внешние (к ним относятся электрические факторы) и внутренние, которыми могут быть тепловые, механические и факторы влияния окружающей среды (табл. 1).

Основные механизмы старения СПЭ изоляции силовых кабелей представлены в табл. 2 [35, 36]. В дополнение к этому в статье [14] показана связь между качеством исходного материала для изготовле-

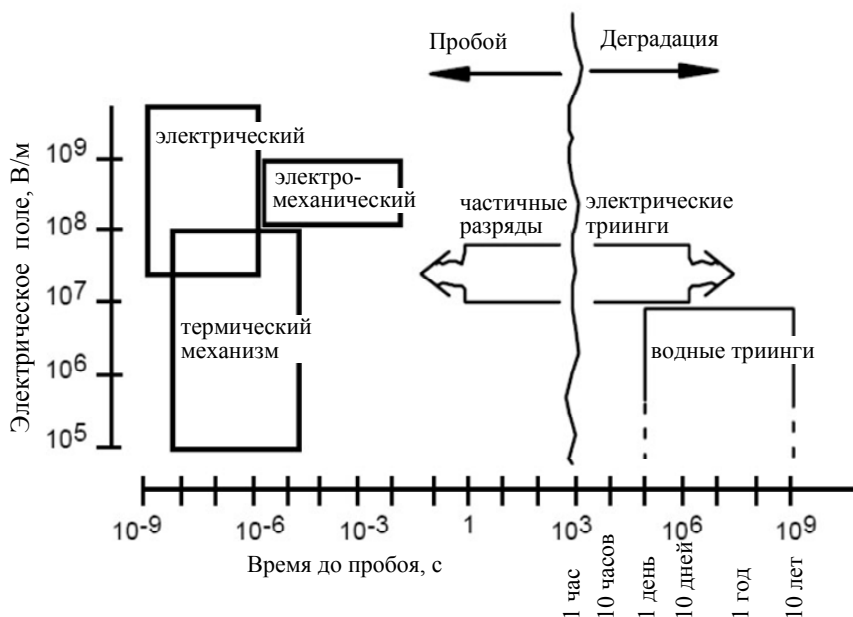


Рис. 2

Таблица 1

Факторы старения полиэтиленовой изоляции			
Внешние факторы	Внутренние / внешние факторы		
Электрические	Термические	Механические	Окружающая среда
– напряжение (переменного / постоянного тока, импульсное); – частота; – электрический ток	– максимальная температура; – низкая / высокая температура окружающей среды; – температурные градиенты; – цикличность изменения температуры	– изгибы; – натяжение; – сжатие; – скручивание; – вибрация	– вода / влажность; – газы (воздух, кислород, др.); – смазочные материалы; – коррозионные химикаты; – радиация

ния изоляции, технологией ее производства, дефектами, структурой, внутренними механическими напряжениями, распределением низкомолекулярных веществ в объеме изоляции, что приводит к повышенным значениям напряженности электрического поля, электрической деградации, термической нагрузке и тепловому старению.

Технология изготовления. Полиэтилен характеризуется хорошими физико-механическими, диэлектрическими и технологическими свойствами [13], благодаря чему находит широкое применение в качестве электроизоляционного материала в кабельной технике. Наиболее значимые преимущества кабелей с СПЭ изоляцией обусловлены в значительной мере свойствами сшитого полиэтилена. Характеристики сшиваемых композиций полиэтилена, наличие силанов, вулканизаторов, условия экструзии и сшивки, режимы охлаждения, степень дегазации влияют на однородность пространственной структуры СПЭ, образование побочных веществ, в целом на физико-химические, электрические и другие свойства изоляции [3, 23, 24, 34].

На этапе выбора исходного материала для изоляции важным является использование

Таблица 2

Повреждения	Процесс старения (в приведенной последовательности)	Типичные причины	Примеры
Электрического характера	Частичные разряды, пробой / эрозия изоляции, начало развития электрических трингов, снижение электрической прочности изоляции	Дефекты изготовления (пустоты, загрязнения и др.)	
Термического характера	Образование продуктов реакции при окислении, разложении, испарении материала вследствие высоких или низких значений температуры, результат этого – увеличение тангенса угла диэлектрических потерь, уменьшение сопротивления изоляции и снижение ее электрической прочности	Некачественная установка соединителя, неправильный выбор арматуры, превышение токовой нагрузки кабеля при заданных внешних условиях и рабочих режимах	
Тринги: – большой длины; – множественные небольшие тринги	Загрязнение и окисление, трекинг на поверхности, деградация изоляции при образовании электрических трингов, увеличение тангенса угла диэлектрических потерь, снижение электрической прочности изоляции	Структурные дефекты и проникновение влаги (извне и через токопроводящую жилу)	
Химического характера	Утолщение, смягчение, растрескивание, сульфатные отложения, в результате чего увеличение тангенса угла диэлектрических потерь и снижение электрической прочности изоляции	Нефтехимические загрязнения (вытекание трансформаторного масла, контакт с химическими продуктами, удобрениями)	

сверхчистых полиолефиновых сшиваемых композиций, например, известных изготовителей "Borealis", "Dow Wire and Cable" или их аналогов. Качество наложения слоев изоляции (полупроводящих экранов и основной изоляции) достигается за счет применения эффективных исходных материалов и современных технологических процессов. Для производства силовых кабелей на среднее, высокое и сверхвысокое напряжения (от 6 до 500 кВ) пероксидная технология сшивки полиэтилена в инертной газовой среде (в среде азота) и при высоких значениях температуры (до 400...450⁰С) и давления (до 20 атм.) является надежным способом изготовления высококачественных кабелей, предпочитается в кабельной промышленности всего мира для данного класса напряжения по сравнению с другими технологиями сшивки (силанольной, радиационной) [22, 23, 37, 44]. Пероксидная сшивка происходит равномерно по всей толщине изоляции, что особенно важно для высоковольтных кабелей с достаточно большой по объему изоляцией и обеспечения ее необходимых эксплуатационных качеств.

К технологическому процессу производства предъявляются требования в части дефектов, концентричности всех слоев изоляции, однородности структуры, размеров выступов экрана в изоляцию, размеров пустот, инородных включений, наличия загрязнений технологического характера, внутренних (механических) напряжений в изоляции [3, 14]. Такие факторы определяют электрическую прочность СПЭ изоляции кабелей высокого и сверхвысокого напряжений.

Ключевые составляющие качества силовых кабелей и соответствующие технологические меры контроля проанализированы также в работах [6, 15, 16, 21]. Отсутствие дефектов на поверхности жилы, включений и пустот в изоляции, гладкая поверхность полупроводящих слоев достигаются путем использования чистых компаундов, герметичности упаковок, фильтрации воздуха при пневмоподаче, тепловых режимов, очистки от загрязнений, в том числе и от металлической пыли [15]. Степень чистоты СПЭ изоляции кабелей различных классов напряжения приведена в табл. 3 [37]. Допустимые размеры дефектов (инородных включений, полостей, выступов полупроводящего слоя в изоляцию) в соответствии с международными стандартами даны в статье [14].

Ряд названных дефектов показан на рис. 3. Среди них – неоднородность структуры изоляции, связанная со скоростью ее экструзии (рис. 3 а [3]); так называемое "гало" из воздушных микрополостей и триинг в его области, обусловленные недостаточной степенью дегазации и загрязненностью изоляции (рис. 3 б [34]); смещение элементов кабеля относительно его центра с нарушением размеров изоляции [49] и неравномерное распределение электрического поля в такой изоляции (рис. 3 в).

Микроразмерные загрязнения технологического характера, среди которых выступы

Таблица 3

Параметры	Напряжение кабелей		
	низкое (6–36 кВ)	среднее (36–161 кВ)	высокое (>161 кВ)
Средняя напряженность электрического поля, кВ/мм	2	6	10
Недопустимый размер загрязнений в СПЭ изоляции, мкм	200–500	100–200	70–100
Размер контролируемых загрязнений в СПЭ изоляции, мкм	100–200	70–100	50–70

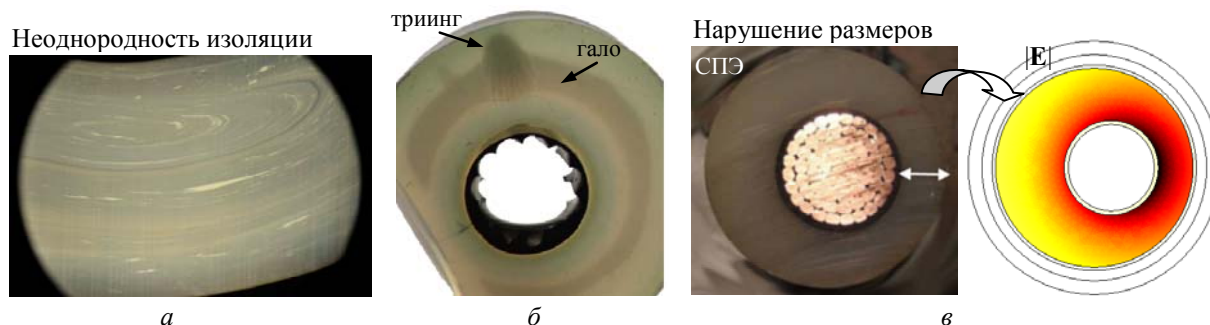


Рис. 3

полупроводящего экрана в изоляцию, частицы хлопкового волокна, используемого в технических целях и для изготовления рабочей одежды, включения сажи, которая является наполнителем электропроводящих композиций экранов по изоляции и жиле, отслоения и полости в экранах, а также макроразмерные дефекты в виде неплотного прилегания экрана к изоляции, прерывания его вдоль жилы, трещины в изоляции исследованы экспериментально и путем компьютерного моделирования, например, в работах [3, 6, 9, 10, 20, 21, 32, 41].

Различие дефектов по причинам возникновения. Надежность и длительный срок службы кабелей достигаются не только за счет соблюдения требований современной технологии производства, но и зависят от профессиональности прокладки и проведения монтажных работ, качества соединения строительных длин и установки кабельных муфт [11], условий окружающей среды, эксплуатационных режимов, уровня технического обслуживания. В соответствии с этим причины повреждения кабелей могут быть разнообразными, и дефекты элементов кабелей подразделяются на следующие группы:

1) дефекты проектирования и технологические недостатки (микровключения, загрязнения, трещины, неплотное прилегание элементов кабеля друг к другу, заниженное сечение жил кабеля, отклонение размеров и неровности поверхности элементов и др.);

2) дефекты прокладки, некачественные монтажные работы и связанные с ними механические повреждения (механические напряжения, приводящие к трещинообразованию; недопустимые изгибы, надрезы, вмятины, изломы; повреждения кабелей подземной прокладки при проведении земляных работ механизированным способом или строительных работ в зоне кабельных трасс и др.);

3) эксплуатационные дефекты, среди которых дефекты, связанные:

– с условиями окружающей среды (дефекты из-за интенсивности проникновения влаги и, как следствие, уровня развития триингов; агрессивности среды, ее температуры, теплового сопротивления почвы для подземных кабелей и связанной с этим коррозией элементов, химической коррозии под воздействием различных химических реагентов, которые содержатся в почве, и др.);

– с условиями функционирования в энергосистеме (среди них – длительность токовых перегрузок и перегрева; изменения напряжения в системе; превышение времени короткого замыкания и др.).

Отметим, что первые две группы повреждений оказывают влияние на кабели в течение всего срока их эксплуатации. В условиях воздействия электрического поля при наличии дефектов в структуре, включая повреждения изоляции, происходит ее ускоренный износ и, как следствие, сокращение срока службы кабеля. Ухудшение качества полиэтиленовой изоляции на микроуровне связано, прежде всего, с дефектами изготовления, описанными выше и показанными на рис. 1 б и рис. 3 а, б. На макроуровне механизмы деградации изоляции вызываются механическими повреждениями, потерей целостности и нарушением изоляционной поверхности, проявляются также в связи с интенсивным развитием микродефектов в процессе длительной эксплуатации кабелей.

На рис. 4 показаны характерные макроуровневые дефекты кабелей с СПЭ изоляцией: дефект установки – глубокий надрез, более 50 % изоляции с триингом на конце [43] (рис. 4 а) и эксплуатационные дефекты – растрескивание изоляции вследствие перегрева [27] (рис. 4 б); обширные воздушные включения в изоляции [27] (рис. 4 в); трещины в изоляции у поверхности жилы [6] (рис. 4 г). Такие дефекты способны развиваться, приводят к изменению не только структуры СПЭ изоляции, но и ее свойств.

Основными условиями распространения дефектов в материале изоляции являются действие электрического поля, проникновение влаги, механические внутренние напряжения и внешние воздействия, временной фактор. Как сообщается в работе [14], чем выше класс напряжения кабеля, тем большее влияние на его качество (на электрическую прочность изоляции) оказывают дополнительные, кроме дефектности, факторы, среди которых, например, уровень механических напряжений. Только внутренние механические напряжения технологического происхождения могут снижать электрическую прочность изоляции на 20...25 %

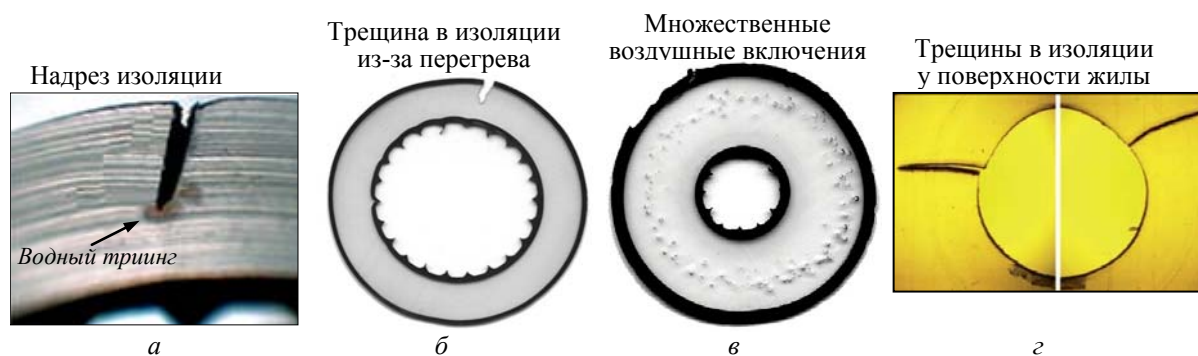


Рис. 4

[14]. В работе [10] расчетным путем также выявлено, что в окрестности макродефектов в СПЭ изоляции и особенно в зоне их заостренных концов имеет место повышенная напряженность электрического поля и большие значения механического напряжения, превышающие предел прочности полиэтилена.

В работе [8], посвященной практическим вопросам испытания и диагностики кабельных линий, выделяются следующие основные типы повреждений кабелей с СПЭ изоляцией:

- внешние повреждения изоляции, вызванные нарушением технологии прокладки (составляют около 70 % от общего количества повреждений);
- внутренние повреждения изоляции вследствие неправильной эксплуатации, например, из-за испытания постоянным напряжением или естественным старением при образовании триингов;
- повреждения защитного экрана и жил кабеля.

Такие повреждения относятся ко второй и третьей группам дефектов силовых кабелей – дефектам прокладки и эксплуатации.

Посторонние включения и триинги в изоляции. К наиболее распространенным причинам старения в СПЭ изоляции относятся неоднородность ее структуры, микроразмерные воздушные полости, загрязнения, водные и электрические триинги. К примеру, микропустоты заполняются газом или водой в присутствии водяного пара и летучих продуктов в производственных процессах изготовления изоляции. Типичное загрязнение полиэтиленовой изоляции показано на рис. 5 а [37]; водные триинги, значительно распространившиеся по толщине изоляции кабеля, – на рис. 5 б [39, 48]. Развитие электрических триингов в СПЭ изоляции с множественными посторонними включениями отображено на рис. 5 в [32]. Электрический триинг (1), выросший из водного (2), показан на рис. 5 г [46].

Триинговые структуры зарождаются под действием электрического поля при условии наличия молекул воды в местах неоднородностей изоляционного материала, где напряженность электрического поля увеличена. Механизмы их возникновения, распространения, а также перерастания водных триингов в электрические изучаются во многих работах, например, в [28, 29, 31, 33, 47]. Разработаны два основных подхода к объяснению процесса образования водных триингов: на основе теории их электрохимического происхождения [31] и вследствие электромеханических процессов в полиэтилене [28, 42]. Для водных триингов принято различать три этапа: возникновение, развитие и преобразование в электрические триинги [31, 36].

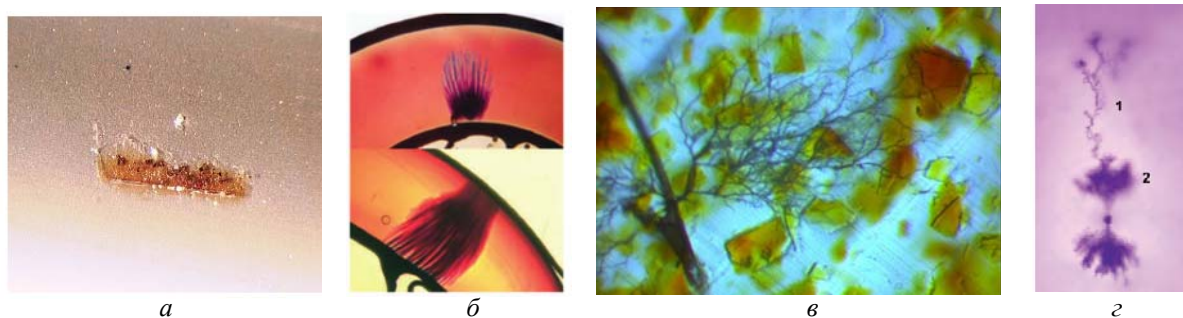


Рис. 5

Формирование и рост водных триингов происходят под действием диэлектрофореза в неоднородном переменном электрическом поле [38, 45, 47]. Интенсивность роста триингов зависит от многих условий, в том числе от напряженности электрического поля, морфологических свойств материала, внутренних и внешних механических напряжений, температуры [30, 31, 42, 46]. Электрический триинг возникает при высокой напряженности поля, развивается быстро и характеризуется частичными разрядами. Каналоподобные структуры электрического триинга (рис. 5 в, г) представляют собой начальную стадию электрического пробоя изоляции. Так, под влиянием водных и электрических триингов происходят деградация изоляции, снижение ее электрической прочности, возможный пробой и, как следствие, быстрый выход кабеля из строя.

Изучению процессов и объяснению механизмов распространения триингов путем компьютерного моделирования посвящены работы [9, 18, 20, 40].

Таким образом, неоднородности в изоляции в виде включений и триингов развиваются в процессе эксплуатации в соответствии со схемой на рис. 2 вплоть до ухудшения физических и эксплуатационных свойств СПЭ изоляции.

Факторы и механизмы старения изоляции. Мультифизические процессы. В дополнение к данным табл. 1, 2 на рис. 6 приведены составляющие состояния СПЭ изоляции силовых кабелей и факторы, влияющие на ее старение.

В соответствии с [25, 30, 31, 35, 36, 37] к факторам старения СПЭ изоляции относятся:

- электрические – величина, максимальные значения, форма изменения, время нарастания, длительность тока и напряжения, полярность, частота, систематические и длительные токовые перегрузки, перенапряжения;
- термические – температурные градиенты, цикличность изменения температуры, рабочая температура, перегрев;
- физические – выступы, дефекты, пустоты, воздушные зазоры с прилегающими элементами;
- механические – растяжения, вибрации, изгибы, скручивание, сдвиги, остаточные напряжения, истирание;
- воздействие окружающей среды и химические факторы – в дополнение к термическим факторам со стороны окружающей среды, ультрафиолетовое излучение, влага, кислород, загрязнения, химикаты.

Результатом совместного влияния электрических, термических, физических и механических факторов в СПЭ изоляции являются возникновение ЧР, водные и электрические триинги, растрескивание изоляции, разрывы, видоизменение структуры, механические напряжения, изменение диэлектрической проницаемости, диэлектрических потерь, удельного сопротивления, механической прочности, джоулев нагрев, тепловое расширение, расслаивание границ, трекинг (повреждение поверхности пробоем), локальные утолщения, хрупкость, диэлектрофорез.

Синергетическое действие электрических, физических, термических и химических факторов приводит к таким механизмам старения: ЧР, триинги, изменение удельного сопротивления и теплопроводности, деполимеризация, гидратация, кристаллизация, химические реакции, окисление, образование продуктов окисления (воды, полярных соединений, газов, кислот).

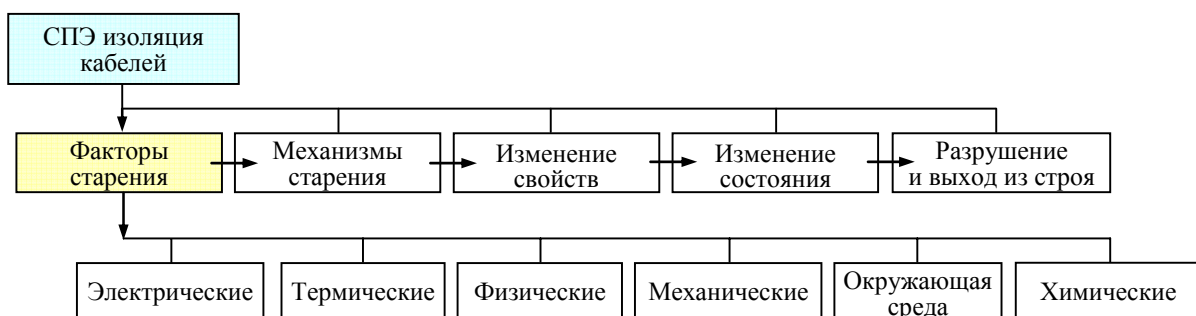


Рис. 6

Проявление факторов старения СПЭ изоляции возможно как на микро-, так и макрокопическом уровнях. К примеру, микроуровневые дефекты СПЭ изоляции показаны на рис. 5 а, в, г. Макроуровневые изменения и разрушения изоляции представлены на рис. 3 б, 4, 5 б, а также на рис. 7 вследствие водных триингов (рис. 7 а [27]) и частичных разрядов (рис. 7 б [7]). Фактическое состояние СПЭ изоляции определяется согласно размеру в ней пустот, содержанию влаги, морфологии материала, наличию газовых включений, окислительному состоянию, длине триингов. Кроме того, оценка состояния изоляции может производиться по величине угла диэлектрических потерь, теплоемкости, уровню ЧР, что используется в методах диагностики кабелей.

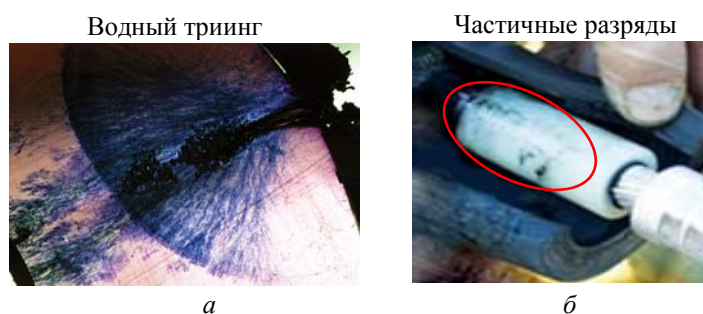


Рис. 7

В соответствии с описанными факторами и механизмами старения различной физической природы при эксплуатации кабелей в СПЭ изоляции проходят мультифизические процессы [19], в том числе электромагнитные, тепловые, механические процессы, связанные между собой. Для случая водных триингов в СПЭ изоляции такие процессы исследованы с использованием метода компьютерного моделирования, например, в работах [19, 40].

Электрические режимы работы. Испытания кабелей. В работах [1, 5, 11] детально описано влияние электрических переходных процессов, перенапряжений, токовых перегрузок, коротких замыканий, количества коммутаций на ресурс СПЭ изоляции и безаварийную работу кабельных линий. Для смешанных линий с кабельными и воздушными участками отмечено влияние грозовых перенапряжений на участке с воздушной линией электропередачи и их переход на кабельный участок [5, 11, 17]. В частности, в статье [17] разработана электрическая модель разрядного тока молнии, которая может быть использована для расчета грозовых перенапряжений в подземных кабельных линиях.

Эффективная эксплуатация кабелей с СПЭ изоляцией предполагает снижение высокочастотных перенапряжений и ограничение времени воздействия на изоляцию перенапряжений промышленной частоты в переходных и установившихся режимах.

Значительное внимание исследователей и специалистов в области кабельной техники уделяется вопросам испытания и диагностики состояния кабелей с СПЭ изоляцией как при эксплуатации, так и после строительно-монтажных и ремонтных работ. Диагностические испытания проводятся с целью определения дефектов, которые могут привести к отказу кабелей, а также прогнозирования времени, по истечении которого дефекты приведут к повреждению кабеля и всей кабельной линии. При испытаниях выявляются механические повреждения изоляции, отклонения в размерах, локальные неоднородности и включения в изоляции кабеля, измеряются сопротивление, емкость и диэлектрические потери материала, а также характеристики ЧР.

Большое преимущество для продолжительного использования изоляции и кабелей имеют неразрушающие методы испытаний кабельных линий, среди которых метод измерения и локализации частичных разрядов, метод измерения возвратного напряжения и тока релаксации в СПЭ изоляции, метод измерения диэлектрических характеристик изоляции.

Использование разрушающих методов контроля, например, испытание изоляции повышенным напряжением, может приводить к ионизационным процессам (частичным разрядам), возникновению и развитию триингов, ускоренному старению изоляции, сокращению ее ресурса.

В мировой практике испытания кабелей с СПЭ изоляцией согласно стандартам МЭК установленная программа тестирования включает [2]:

- измерение уровня ЧР для обнаружения полостей в изоляции, в том числе на границе раздела между изоляцией и полупроводящими слоями;

- измерение тангенса угла диэлектрических потерь для проверки качества и степени дегазации изоляции;
- испытание коммутационными импульсами для кабелей напряжением свыше 300 кВ с целью оценки стойкости к действию положительных и отрицательных коммутационных импульсов;
- испытание грозowymi импульсами для определения стойкости к действию положительных и отрицательных грозowych импульсов;
- испытание переменным напряжением для оценки стойкости к действию переменного напряжения большой амплитуды.

Заключение. Проблема достижения высокого качества, надежности и длительного срока использования СПЭ изоляции силовых кабелей является комплексной. Решение ее возможно при учете всесторонних условий:

- со стороны производителей и разработчиков – использование современных технологий, качественных материалов, усовершенствованных конструкций кабелей;
- со стороны строительно-монтажных и ремонтных организаций – осуществление квалифицированных прокладки и ремонтов кабельных линий;
- со стороны эксплуатирующих компаний – соблюдение приемлемых условий окружающей среды, недопустимости риска при электрических перегрузках, аварийных режимах и отказах, проведение контрольных испытаний, предусмотренных нормативными документами, обеспечение надлежащего технического обслуживания (диагностики) и своевременного ремонта кабелей и кабельных линий.

Изучение многофакторных причин и мультифизических процессов, сопровождающих старение и приводящих к пробое и выходу из строя СПЭ изоляции силовых кабелей, позволяет предусмотреть технологические и практические меры для сохранения ее качества и продления ресурса, а значит, для достижения высокой надежности функционирования кабелей.

1. Бурлаков Е., Евдокунин Г., Карнов А., Шатилов Д. Высоковольтные линии с однофазными кабелями. Переходные процессы и перенапряжения // Новости Электротехники. – 2016. – № 5(101). – <http://www.news.elteh.ru/arh/2016/101/07.php>
2. Верхувен Б. Международная практика испытаний кабелей // Кабели и провода. – 2006. – № 1 (296). – С. 10–14.
3. Гук Д.А., Каменский М.К., Макаров Л.Е., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Шувалов М.Ю. Новый высоковольтный испытательный центр ОАО "ВНИИКП". Опыт испытаний и исследований силовых кабелей, арматуры и материалов для их производства // Кабели и провода. – 2014. – № 5(348). – С. 35–42.
4. Дмитриев М.В. Особенности применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Сети России. – 2015. – № 3 (30). – С. 62–65.
5. Дмитриев М.В. Проектирование и строительство кабельных линий 6–500 кВ. Актуальные проблемы // Новости Электротехники. – 2016. – № 4(100). – <http://www.news.elteh.ru/arh/2016/100/03.php>
6. Ковригин Л.А. Технологические и эксплуатационные дефекты в изоляции кабелей // Кабель-news. – 2008. – № 10. – С. 58–60.
7. Копченков Д. Диагностика высоковольтных кабельных линий. Опыт внедрения // Кабель-news. – 2012. – № 3. – http://www.ruscable.ru/article/Diagnostika_vysokovoltnyx_kabelnyx_linij_Opyt/
8. Королев А. Испытание и диагностика кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена // Кабель-news. – 2010. – № 11. – http://www.ruscable.ru/article/Ispytanie_i_diagnostika_kabelnyx_linij_s/
9. Кучерявая И.Н. Влияние микродефектов в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей на распределение электрического поля // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. – К.: ІЕД НАНУ, 2017. – Вип. 47. – С. 85–92.
10. Кучерявая И.Н. Исследование эксплуатационных дефектов силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. – К.: ІЕД НАНУ, 2017. – Вип. 46. – С. 107–112.
11. Кучерявая И.Н. Причины выхода из строя муфт кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на среднее и высокое напряжение // Гідроенергетика України. – 2017. – № 1–2. – С. 63–80.
12. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
13. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / Под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. – Т. 3. – М.: Папирус-Про, 2004. – 688 с.

14. Мещанов Г.И., Шувалов М.Ю., Каменский М.К., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л. Кабели на напряжение 10–500 кВ: состояние и перспективы развития (анализ, прогноз, исследования) // Кабели и провода. – 2008. – № 5 (312). – С. 32–38.
15. Образцов Ю.В. Отечественные кабели среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена для линий электропередач // Кабель-news. – 2009–2010. – № 12–1. – С. 45–49.
16. Образцов Ю.В., Фрик А.А., Сливов А.А. Силовые кабели среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Факторы качества // Кабели и провода. – 2005. – № 1 (290). – С. 9–13.
17. Подольцев А.Д. Компьютерное моделирование грозовых перенапряжений в высоковольтной воздушной линии электропередачи // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – К.: ІЕД НАНУ, 2017. – Вип. 46. – С. 94–106.
18. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизические процессы в области включения в полиэтиленовой изоляции силового кабеля (трехмерное моделирование и эксперимент) // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 3. – С. 3–9.
19. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. – 305 с.
20. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. – К.: Изд-во Ін-та електродинаміки НАН України, 2013. – 550 с.
21. Шувалов М.Ю., Ромашкин А.В., Овсиенко В.Л. Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 49–57.
22. Щерба А.А., Гурин А.Г., Ольшевский А.М., Карпушенко В.П., Науменко А.А. Новая технология пероксидной сшивки полиэтиленовой изоляции – основа производства высоконадежных силовых кабелей на напряжение 6–500 кВ // Электропанорама. – 2012. – № 4. – С. 16–21.
23. Щерба А.А., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Белянин Р.В. Особенности производства и эксплуатации сшитополетиленовой изоляции силовых кабелей разных классов напряжения // Гідроенергетика України. – 2016. – № 1–2. – С. 30–40.
24. Щерба А.А., Кучерявая И.Н., Кирик В.В., Цыганенко Б.В. Мировой опыт применения сшитой полиэтиленовой изоляции для производства силовых кабелей разных классов напряжения // Электрические сети и системы. – 2015. – № 5. – С. 11–20.
25. Bahadoorsingh S., Rowland S.M. A framework linking knowledge of insulation ageing to asset management // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2008. – Vol. 24, Is. 3. – P. 38–46.
26. Bernstein B.S. Recent progress in understanding water treeing phenomena // IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – Montreal, June 11–13, 1984. – P. 11–21.
27. Buchholz V. Finding the root cause of power cable failures. – http://www.electricenergyonline.com/show_article.php?article=186
28. Crine J-P., Jow J. A water treeing model // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2005. – Vol. 12, № 4. – P. 801–808.
29. Densley J. Ageing and diagnostics in extruded insulations for power cables // IEEE 5th Internat. Conf. on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics. – 1995. – 15 p.
30. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2001. – Vol. 17, No. 1. – P. 14–22.
31. Dissado L., Fothergill J. Electrical degradation and breakdown in polymers / IEE Materials and Devices. Series 9. – Peter Peregrinus Ltd., London, 1992. – 601 p.
32. Doedens E.H. Organic contaminants in crosslinked polyethylene for demanding high voltage applications // Diploma Work in the Master Programme of Electric Power Engineering. – 2012. – Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. – Report No. 83/2012. – 86 p.
33. *Electrical power cable engineering* / Third Edition. Ed. by W.A. Thue. – CRC Press, 2011. – 460 p.
34. Footitt E. Statistical, electrical and mathematical analysis of water treed cross-linked polyethylene cable insulation // Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the School of Engineering Systems Science and Engineering Faculty at the Queensland University of Technology. – Brisbane, Australia. – 2015. – 214 p.
35. Hampton N. HV and EHV cable system aging and testing issues. Chapter 3. – University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. – Georgia Tech Research Corporation, February 2016. – 19 p.
36. Hampton N. Medium voltage cable system issues. Chapter 2. – University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. – Georgia Tech Research Corporation, February 2016. – 29 p.
37. Hampton N., Hartlein R., Lennartsson H., Orton H., Ramachadran R. Long-life XLPE insulated power cable. – JiCable 2007. – http://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf
38. Hughes M.P. Numerical simulation of dielectrophoretic ratchet structures // Journal of Physics D: Applied Physics – 2004. – Vol. 37. – P. 1275–1280.

39. Hvidsten S., Holmgren B., Adeen L., Wetterstrom J. Condition assessment of 12- and 24- kV XLPE cables installed during the 80s. Results from a joint Norwegian/Swedish research project. // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2005. – Vol. 21, No. 6. – P. 17–23.
40. Kucheriava I.M. Coupled electrical and mechanical processes in polyethylene insulation with water tree having branches of complex structure // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2016. – № 5. – P. 5–10.
41. Kucheriava I.M. Power cable defects and their influence on electric field distribution in polyethylene insulation // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2017. – № 2. – P. 19–24.
42. Marcolongo P. Modeling electromechanical phenomena contributing to cable deterioration // Thesis for the degree of Master of Science in Engineering – Materials Science and Engineering. – University of Puda, Italy, 2008. – 58 p.
43. Mashikian M. S., Szatkowski A. Medium voltage cable defects revealed by off-line partial discharge testing at power frequency // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2006. – Vol. 22, No. 4. – P. 24–32.
44. Nexans Technical Review – October 2004.– http://www.nexans.com/eservice/Corporate-en/fileLibrary/Download_540073071/eService/files/tech_review2d.pdf
45. Patsch R. The role of dielectrophoresis in the water treeing process // 1995 Annual Report. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. – 22–25 Oct. 1995. – P. 73–76.
46. Peshkov Iz. B., Shuvalov M. Yu., Ovsienko V.L. Water treeing in extruded cable insulation as Reh binder electrical effect // Journal of Information Technology and Applications (JITA). – 2015. – No. 5. – P. 55–60.
47. Steennis E.F., Kreuger F.H. Water treeing in polyethylene cables. Review // IEEE Trans. on Electrical Insulation. – 1990. – Vol. 25, No. 5. – Pp. 989–1028.
48. Teyssedre G., Laurent C. Advances in high-field insulating polymeric materials over the past 50 years // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2013. – Vol. 29, No. 5. – P. 26–36.
49. Williams F.D. Cable accessory failure analysis. – A Research Center in the School of Electrical and Computer Engineering at the Georgia Institute of Technology. – 2010. – 59 p.

УДК 621.315.2 : 004.94

І.М. Кучерява, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

Фактори якості та надійності зшито-поліетиленової ізоляції силових кабелів

Наведено фактори та механізми старіння зшито-поліетиленової ізоляції силових кабелів, мультифізичні процеси та явища, що супроводжують деградацію і призводять до пробоя ізоляції. Представлено характерні дефекти ізоляції, які виникають при виробництві, проектуванні, прокладанні та експлуатації кабелів. Проаналізовано причини виникнення дефектів і ушкоджень ізоляції. Показано роль електричних режимів роботи кабелів і переваги використання неруйнуючих методів їх випробування для тривалого терміну служби ізоляції. Бібл. 49, рис. 7, табл. 3.

Ключові слова: зшито-поліетиленова ізоляція, силові кабелі, макро- та мікрорівневі дефекти, фактори і механізми старіння ізоляції, перехідні процеси, високочастотні перенапруги, методи випробування.

І.М. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

The factors affecting quality and reliability of XLPE insulation of power cables

The paper presents the factors and mechanisms influencing on the degradation of cross-linked polyethylene (XLPE) insulation of power cables, multiphysics processes and phenomena that take place at the aging of the insulation and lead to its breakdown. The typical defects of XLPE insulation which result from the production, design, laying and operation of the cables are shown and explained. The causes of damages and defects of the insulation are analyzed. The significance of electrical operating conditions of the cable and the need to use non-destructive testing methods for the long service life of XLPE insulation are revealed. References 49, figures 7, tables 3.

Key words: cross-linked polyethylene insulation, power cables, macro- and micro-sized defects, aging factors and mechanisms, transient processes, high-frequency overvoltages, testing methods.

Надійшла 14.07.2017

Received 14.07.2017