

С.С. Екимук, И.Ю. Цивилёв, аспиранты кафедры Техники и электрофизики высоких напряжений Новосибирского государственного технического университета

# ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

## [защита от перенапряжений, диагностика и испытания]

### Введение

Технология создания кабельной изоляции из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляция) появилась в 70-х годах 20 века. И до настоящего времени шел непрерывный процесс улучшения, как характеристик самой изоляции, так и технологии сшивки. Высокие электроизоляционные показатели позволили кабелям с СПЭ-изоляцией прийти на смену традиционным кабелям с бумажно-масляной изоляцией (БМИ) сначала в мире, а затем и в России, и занять при этом первое место в области кабельной продукции.

По заверениям зарубежных и отечественных предприятий-изготовителей поток отказа кабелей с пластмассовой изоляцией (КПИ) на один-два порядка меньше по сравнению с кабелями с бумажной масляной изоляцией (БМИ). Именно поэтому кабели нового поколения являются столь привлекательными для эксплуатирующих организаций распределительных кабельных сетей (РКС).

Согласно проведенным расчетным исследованиям в статье [1], высокочастотные воздействия на изоляцию кабелей из сшитого полиэтилена могут приводить к ускорению развития водных триингов. Для разработки адекватных критериев оценки параметров высокочастотных воздействий, критичных для СПЭ-изоляции кабеля, целесообразно проведение импульсных испытаний образцов кабеля, изъятых из эксплуатации, с последующим анализом интенсивности роста триингов.

Без сомнения представляет интерес анализ воздействий на СПЭ-изоляцию кабелей в процессе их эксплуатации, в том числе и высокочастотных.

Высокочастотные (ВЧ) процессы возникают при внутренних (коммутационных) и внешних (грозовых) перенапряжениях. Коммутационные перенапряжения характеризуются (в том числе) зоной охвата и могут воздействовать как на все оборудование сети в целом, так и на оборудование только одного присоединения. К числу первых относятся однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) и однофазные дуговые замыкания (ОДЗ), ко второму – коммутации присоединений выключателями, которые генерируют высокочастотные перенапряжения при повторных зажиганиях дуги в их дугогасительных камерах.

### Электромагнитные переходные процессы в сетях 6–10 кВ

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) и однофазные дуговые замыкания (ОДЗ). Режим существования перемежающихся дуговых замыканий может составлять несколько

минут, и на протяжении всего этого времени на изоляцию сети воздействуют перенапряжения высокой частоты (до нескольких кГц) и амплитуды (до  $(3,0-3,5)U_{фн}$ ). На рис. 1 представлена компьютерная осциллограмма перенапряжений при ОДЗ в кабельной распределительной сети 10 кВ протяженностью около 15 км. Как видно из осциллограммы, в переходном процессе после погасания дуги на составляющую напряжения промышленной частоты (50 Гц) накладывается высокочастотная составляющая (около 1200 Гц), практически затухающая к моменту последующего повторного зажигания дуги. Наибольшие градиенты напряжения наблюдаются в первый момент после гашения дуги и составляют 0,4 кВ/мкс (приведенные значения справедливы лишь для конкретной рассматриваемой сети).

Следует отметить, что в отечественных сетях, эксплуатируемых с изолированной или заземленной с помощью дугогасящих реакторов (ДГР) нейтралью, изоляция «здоровых» фаз кабелей в режиме ОЗЗ подвергается воздействию линейного напряжения до 4–6 часов. Последний фактор приводит к созданию благоприятных условий для развития триингов в электрически ослабленных местах, локально распределенных по толщине изоляции и длине кабеля.

При поэтапной замене кабелей с БМИ на кабели с СПЭ-изоляцией, в распределительных кабельных сетях будут эксплуатироваться в одной электрической сети кабели с различными механизмами пробоя и деградации электрической изоляции, а также разной степенью износа.

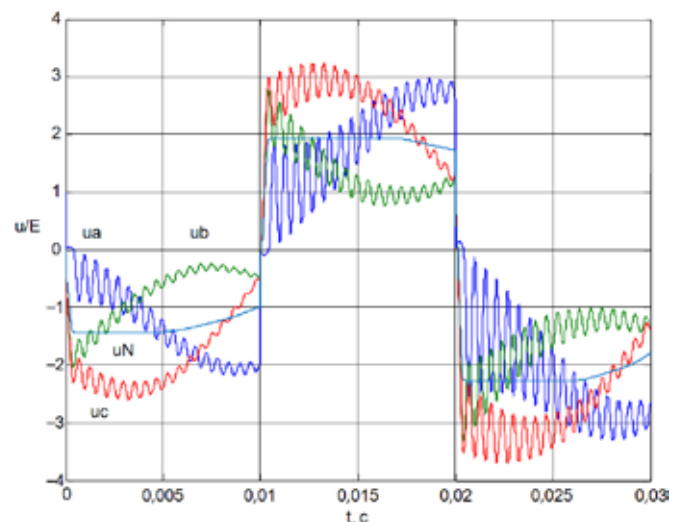
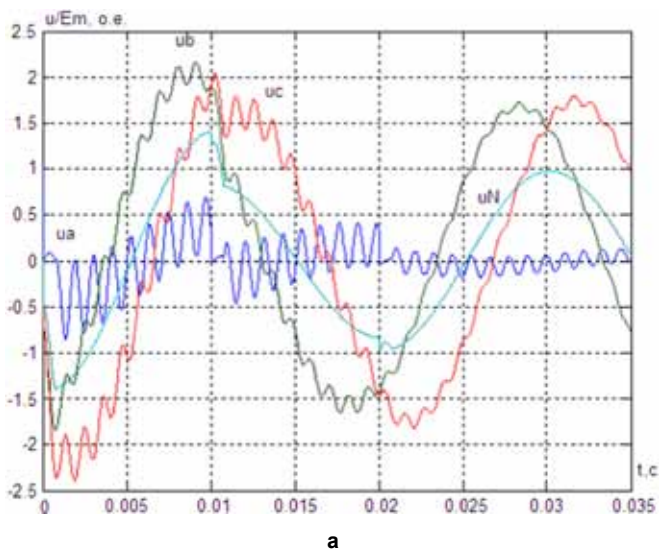
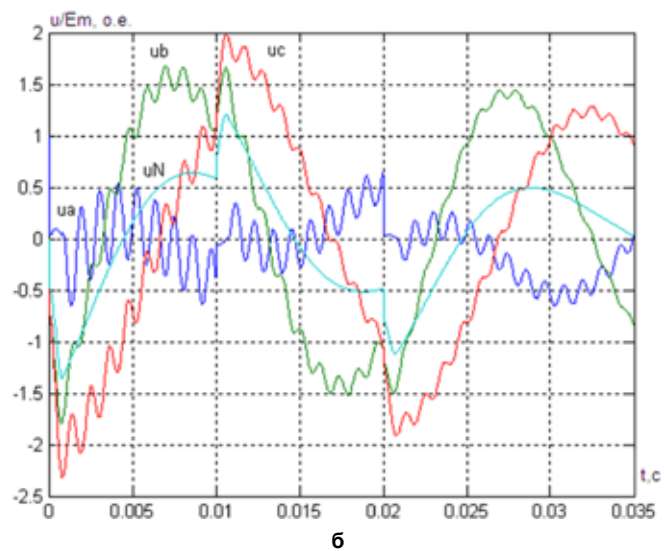


Рис. 1. Компьютерная осциллограмма перенапряжений при ОДЗ в кабельной сети 10 кВ



а в нейтрали только ДГР



б в нейтрали резистор и ДГР

Рис. 2. Компьютерные осциллограммы перенапряжений в сети при ОДЗ

Эксплуатация комбинированных кабельных сетей (содержащих кабели с БПИ и СПЭ-изоляцией) при оснащении их нейтралей ДГР может быть оправдана лишь при автоматическом регулировании степени компенсации емкостного тока ОЗЗ, когда при электрическом пробое кабелей с бумажной пропитанной изоляцией высока вероятность самоустранения горения дуги. В этом случае длительность перенапряжений минимальна, уровень перенапряжений отвечает первичному зажиганию дуги  $(2,3-2,5)U_{фм}$ , а переход перемежающегося характера горения дуги в металлическое замыкание практически невозможен. В случае пробоя кабеля с СПЭ-изоляцией положительный эффект ДГР заключается в снижении тока ОЗЗ, что способствует уменьшению разрушающего действия дуги в месте пробоя, то есть препятствует переходу ОЗЗ в двухфазное замыкание, а также повреждению соседних кабелей. Это обстоятельство наиболее актуально при отсутствии резервирования в сети, позволяющего немедленное отключение поврежденного фидера.

Однако применяемые в настоящее время способы автоматического регулирования ДГР имеют ряд недостатков: они не обеспечивают должного быстродействия настройки параметров ДГР в резонанс с емкостью сети; не всегда корректно осуществляется управление реактором. В то же время при резонансной настройке ДГР осложняется селективное определение поврежденного присоединения средствами релейной защиты (РЗ).

В последние годы все большую популярность приобретает резистивное заземление нейтрали, при реализации которого удается добиться значительного снижения перенапряжений. При всех последующих повторных зажиганиях дуги уровень перенапряжений не превышает уровня при первичном зажигании  $(2,3-2,5)U_{фм}$  [2]. К тому же селективное определение поврежденного присоединения возможно с помощью простейшей ненаправленной токовой защиты, поскольку активная составляющая тока замыкания на землю, определяемая резистором в нейтрали сети, протекает только в этом фидере.

Вместе с тем резистивное заземление нейтральной точки сети приводит к существенному увеличению тока ОЗЗ (до 40 %). Это обстоятельство при значительной протяженности сети может привести к перегреву некоторого электрообо-

рудования и последующему выходу его из строя, а также к более тяжелым последствиям в месте повреждения.

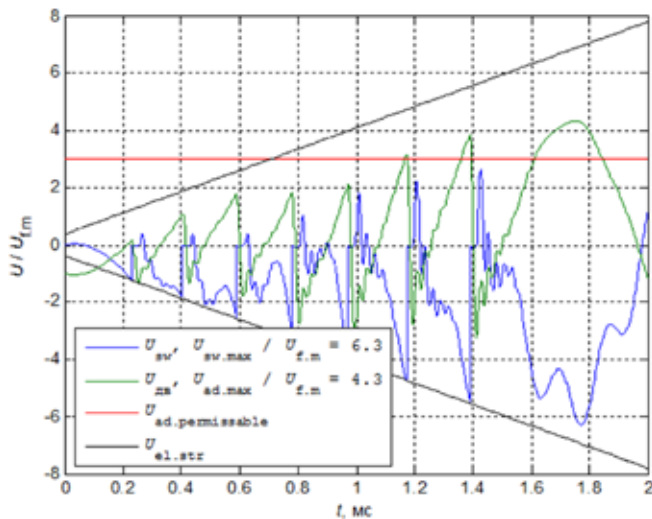
Сочетание положительных сторон резистивного заземления и установок ДГР может быть достигнуто их параллельным соединением – комбинированным заземлением нейтрали.

На рис. 2 приведены характерные компьютерные осциллограммы процессов при ОДЗ в сети 6 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР (а), и ДГР, установленным параллельно резистору (б).

**Коммутационные перенапряжения.** В настоящее время в сетях среднего напряжения повсеместно осуществляется замена маломасляных выключателей, уже снятых с производства и морально и физически устаревших, на вакуумные выключатели (ВВ), обладающие высокой надежностью, существенно большим коммутационным ресурсом и не требующие специального обслуживания в течение всего срока службы (15–30 лет).

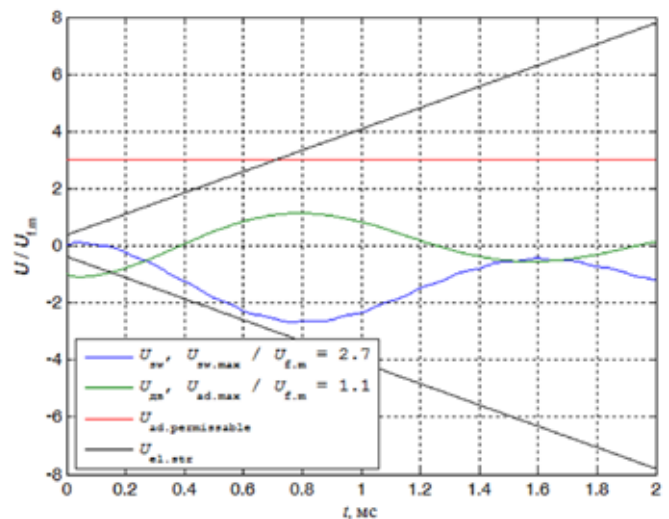
При коммутациях вакуумными выключателями возникают опасные повторные зажигания дуги в вакуумных дугогасительных камерах (ВДК), приводящие к перенапряжениям высокой частоты. Именно опасные, так как маломасляные выключатели (ММВ) также давали большое количество повторных зажиганий, но при малых напряжениях. Поскольку электрическая прочность вакуума в ВДК существенно больше, чем масла в ММВ, то повторные зажигания возникают при больших напряжениях, и, следовательно, более опасны. При этом инициализация таких перенапряжений зависит от характеристик ВДК и приводов вакуумных выключателей, а также от параметров сети.

Таким образом, вакуумные выключатели являются источником для СПЭ-изоляции высокочастотных процессов (десятки кГц – единицы МГц), неблагоприятно воздействующих на СПЭ-изоляцию, и могут быть причиной возникновения ОЗЗ и ОДЗ в рассматриваемых сетях, снижения ресурса электрической прочности и, как следствие, каскадного выхода из строя кабелей с БМИ и СПЭ-изоляцией. Идеальным выходом будет полная отстройка от воздействия такого рода перенапряжений, которые также представляют опасность для нагрузки, имеющей витковую изоляцию – электродвигателей и силовых трансформаторов. В качестве защитной меры могут быть использованы RC-цепочки,



а

без RC-цепочки



б

с установкой RC-цепочки

Рис. 3. Осциллограммы напряжений на контактах выключателя и на двигателе при токе среза 5 А, с учетом повторных зажиганий дуги, при скорости восстановления электрической прочности – 20 кВ/мс

устанавливаемые на выводах защищаемого объекта. Они способствуют снижению частоты электромагнитного переходного процесса, возникающего при коммутациях. Однако надо учитывать, что эти защитные аппараты способствуют некоторому увеличению тока однофазного замыкания на землю.

На рис. 3 (а и б) приведены осциллограммы процесса отключения первой фазы двигателя мощностью 315 кВт и кабеля длиной 750 м без установки и с установкой RC-цепочки у двигателя (напряжение на фазе А двигателя – зеленый цвет, восстанавливающееся напряжение на контактах – синий, восстанавливающаяся электрическая прочность изоляционного вакуумного промежутка – черный). Наибольший градиент напряжения при повторных зажиганиях дуги в вакуумной дугогасительной камере выключателя составляет 3,7 кВ/мкс (частоты колебаний достигают 50 кГц), кратность перенапряжений для этого случая –  $4,3U_{фл}$ . При больших значениях мощности коммутируемого двигателя и меньшей длине кабеля присоединения двигателя к РУ величины кратностей перенапряжений и их градиентов будут иметь еще большие значения.

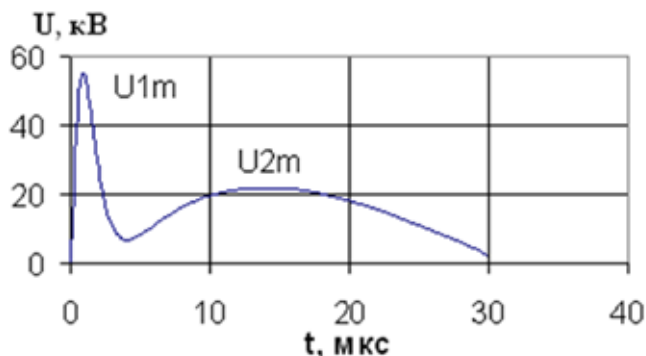


Рис. 4. Примерная волна напряжения в сети среднего напряжения 6–10 кВ

**Грозовые воздействия.** Опасные грозовые воздействия на кабельные линии (КЛ) могут возникнуть лишь при наличии трансформаторной или гальванической связи с воздушными линиями (ВЛ) электропередачи, то есть с оборудованием, подверженным ударам молнии.

При наличии трансформаторной связи между ВЛ и КЛ примерная осциллограмма напряжения на стороне низшего напряжения трансформатора при воздействии полной грозовой волны приведена на рис. 4.

Первый пик этой волны определяется в основном емкостными связями между обмотками трансформатора, второй пик – электромагнитными связями. При воздействии срезанной волны второй пик перенапряжений отсутствует. Как правило, первый пик перенапряжений превосходит второй. Поэтому наиболее опасные воздействия на изоляцию кабельной сети возникают при воздействии срезанных волн.

Импульсная электрическая прочность кабеля с СПЭ-изоляцией достаточно существенно превышает импульсную прочность статорной изоляции электрических двигателей или генераторов, присоединенных к обмотке НН силового трансформатора с помощью СПЭ-кабеля. Кроме того, как отмечалось выше, возможно ускорение развития водных триингов в СПЭ-изоляции в результате воздействия высокочастотных импульсов. Поэтому для обеспечения надежной эксплуатации изоляции вращающихся машин или градиентной изоляции трансформаторов собственных нужд на стороне НН силового трансформатора, как правило, устанавливаются дополнительные конденсаторы. Их эффективность обусловлена тем, что при этом существенно уменьшается коэффициент деления делителя, образованного емкостными связями между обмотками трансформатора и емкостью его обмотки низшего напряжения, что и приводит к снижению уровня перенапряжений на кабеле, подключенном со стороны низшего напряжения силового трансформатора. Последнее обстоятельство также обеспечивает более длительный срок эксплуатации кабелей с СПЭ-изоляцией без ее деградации.

### Эксплуатация кабелей с СПЭ-изоляцией при воздействии гармонических колебаний, генерируемых в сети металлургических предприятий

При проектировании электроснабжения промышленных предприятий, технологический цикл которых связан с появлением в напряжении на шинах их распределительных устройств (РУ) высокочастотных составляющих, необходимо предусматривать специальные меры, препятствующие воздействию этих гармонических на электрооборудование питающей сети. В питающей сети также могут возникнуть ситуации, при которых возникают высшие гармонические, пагубно воздействующие на оборудование, характеризующееся градиентной изоляцией (например, трансформаторов, электрических двигателей) или кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Поэтому для грамотного анализа электромагнитных процессов, сопровождающих эксплуатацию таких объектов, а, следовательно, и для предотвращения технологических нарушений в питающей сети необходимо рассматривать как аномальные процессы, происходящие в питающих сетях, так и иметь информацию о гармоническом составе напряжения на шинах главного распределительного устройства технологического объекта.

В качестве примера, иллюстрирующего метод решения поставленной задачи, рассматривается схема электроснабжения дуговой сталеплавильной печи (ДСП) (рис. 5). На шинах до токоограничивающего реактора установлены фильтры 2–5 гармоник (не изображены).

Процесс горения дуги в ДСП достаточно сложен, и выплавка стали, особенно в своей начальной стадии, характеризуется беспокойным и неустойчивым горением дуги, что оказывает существенное влияние на процессы в питающей сети.

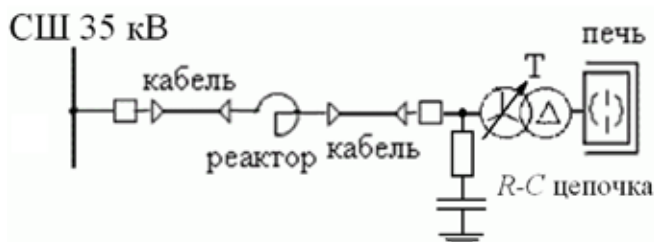


Рис. 5. Схема питания дуговой сталеплавильной печи от СШ 35 кВ

На рис. 6 для примера приведена осциллограмма напряжения фазы В, зарегистрированная в реальной схеме (рис. 5) на выводах токоограничивающего реактора со стороны печи, и ее растяжение в течение одного периода промышленной частоты (б). В остальных фазах процессы аналогичны.

Из приведенной осциллограммы следует, что в кривых напряжения присутствуют высшие гармонические, причем процессы являются нестационарными, что предопределяет применение для анализа их гармонического состава вейвлет-анализа [3], позволяющего выявить в кривых напряжения и тока широкий спектр гармоник с учетом их изменения во времени.

Произведенный вейвлет-анализ зарегистрированных осциллограмм показал, что в их гармоническом составе присутствует частоты около 2 кГц (сороковая гармоника), амплитуда которой достигает 7 кВ. В рассматриваемой схеме питания ДСП эта составляющая может привести, в частности, к технологическому нарушению электрически ослабленной СПЭ-изоляции кабелей, связанному с продолжительным влиянием этой частоты на изоляцию кабелей на молекулярном уровне, в том числе и дополнительным перегревом самой изоляции. При этом уже установленные на шинах фильтры не позволяют обеспечить ограничение этих колебаний. Кроме того, в результате анализа повреждений кабельной линии, питающей печной трансформатор, был выявлен ряд нарушений в прокладке линии (например, продавливание защитной оболочки кабелей хомутами и металлическими уголками). Одним из путей повышения надежности эксплуатации питающей сети может быть установка дополнительного фильтра перед печным трансформатором.

Важно также отметить, что физика возникновения колебаний относительно низких частот (2–5 гармоники) и частоты порядка 2 кГц, обусловленных процессом горения печной дуги, принципиально различаются. Первые возникают по причине нелинейности дуги, вторые – в результате зажигания и погасания дуги. Это и определяет особенность возникающих процессов: если рассматривать схему замещения сети, то источником гармоник порядка 2–5 можно считать источник тока или напряжения. При этом сами частоты процессов практически не зависят от параметров схемы замещения. Колебания порядка 2 кГц являются реакцией схемы на возмущение, обусловленное резким изменением напряжения на дуге при ее погасании или зажигании, то есть частоты этих колебаний зависят, в основном от сочетания индуктивных параметров схемы

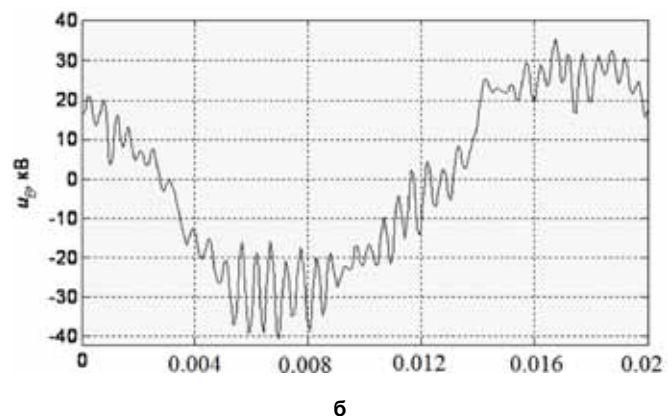
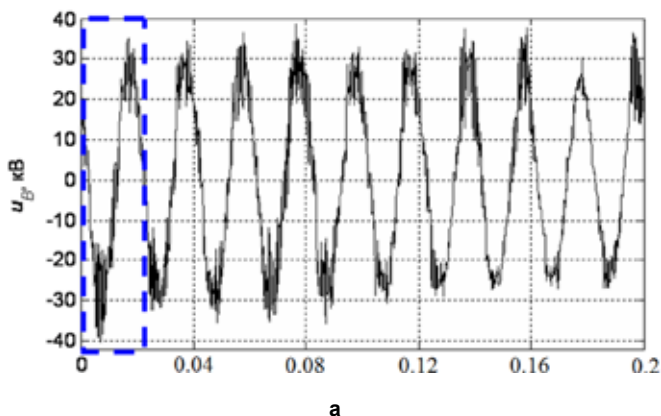


Рис. 6. Осциллограмма напряжения на фазе В длительностью 0,2 с (а) и растяжение ее начального участка до 0,02 с (б)

замещения. В связи с этим, принципы фильтрации этих двух типов колебаний должны различаться. Поэтому выбор дополнительного фильтра должен основываться не на стандартной методике, основанной на расчете схемы замещения сети для гармоник тока, инжектируемой в сеть источником тока [4], а на ином подходе. Обработка же с помощью вейвлет-анализа осциллограмм реальных процессов в сети питания нелинейной нагрузки позволяет оценить эффективность эксплуатации уже установленных силовых фильтров, а также необходимость в дополнительных фильтрах.

**Выбор номинального напряжения кабеля с изоляцией СПЭ и режим заземления нейтрали.** С целью повышения ресурса изоляции кабельных линий необходимо правильно выбирать номинальное напряжение кабеля, проверяя необходимость использования его изоляции на более высокий класс напряжения. Это условие можно пояснить следующим образом.

В существующей отечественной литературе и практике проектирования полагается очевидным, что номинальное напряжение кабеля, обозначенное заводом-изготовителем, должно соответствовать номинальному напряжению сети. Однако согласно международному стандарту IEC (МЭК) 60502-2 выбор номинального напряжения кабеля определяется режимом эксплуатации нейтрали сети, а именно – длительностью существования режима однофазного замыкания на землю. При этом все сети делятся на три категории (А, В, С) в зависимости от допустимой длительности существования режима ОЗЗ:

- категория А включает те системы, в которых любой фазный проводник, который приходит в соприкосновение с землей или с заземленным проводником, отключается от питающей системы за время менее одной минуты;

- категория В включает те системы, которые в течение короткого времени могут эксплуатироваться с одной заземленной фазой. Согласно IEC 60183, 1984, это время не должно превышать одного часа. Для кабеля, подпадающего под этот стандарт, может допускаться и более длительный период, в любом случае не превышающий, однако, восьми часов. Полная продолжительность замыканий за год не должна превышать 125 ч;

- категория С включает все системы, которые не относятся к категориям А и В.

Следует отметить, что шкала номинальных напряжений сетей класса 6–35 кВ, используемая в стандарте IEC (6, 10, 15, 20, 30, 35 кВ) имеет две дополнительные, по сравнению с отечественной (6, 10, 20, 35 кВ) ступени.

Принимая во внимание то обстоятельство, что в подавляющем большинстве распределительных сетей, а также сетей промышленных предприятий, допускается длительное существование режима однофазного замыкания на землю, эти сети попадают под категорию С международного стандарта. Следовательно, кабели СПЭ, применяемые в этих сетях, должны выбираться с уровнем изоляции выше, чем номинальное напряжение сети. Иначе также следует организовать настройку релейной защиты от замыканий на землю, действующей на отключение. Использование такого варианта возможно при соответствующем номинале резистора, установленного в нейтрали сети.

**Диагностика и испытания.** К трудностям в обеспечении соответствующей надежной эксплуатации кабелей с СПЭ-изоляцией также стоит добавить отсутствие в настоящее время четко прописанных, утвержденных в нормативных

документах, рекомендаций по испытанию кабелей после монтажа и проведению профилактических испытаний.

Согласно [5] приемосдаточные испытания силовых кабелей рекомендуется проводить выпрямленным напряжением  $6U_{ном}$  в течение 10 мин. Основным назначением испытания кабеля повышенным выпрямленным напряжением является доведение ослабленного места в них до пробоя с целью предотвращающего аварийного выхода кабельной линии (КЛ) в эксплуатацию. Однако успешно проведенные испытания не гарантируют последующую безаварийную работу КЛ, так как они могут нанести вред СПЭ-изоляции в виде остаточных явлений и тем самым способствовать снижению ее электрической прочности, поскольку сами испытания оказывают негативное воздействие на полиэтиленовую изоляцию.

За рубежом проведены обширные исследования, доказывающие, что испытания повышенным постоянным напряжением не только не позволяют сделать адекватное заключение о состоянии кабеля, но и значительно ослабляют изоляцию. Распределение постоянного напряжения по толщине электрической изоляции кабелей из сшитого полиэтилена и пропитанной бумаги принципиально разное. За счет образования объемных зарядов у электродов на внутренней и наружной поверхностях изоляции из сшитого полиэтилена образуется локальная концентрация электрического поля, которая может привести к разрушениям в виде скользящих разрядов и пробоя. Также доказано, что приложение постоянного повышенного напряжения способствует развитию (росту) триингов и дендритов в толщине изоляции, что уменьшает срок эксплуатации кабелей.

Кроме того, испытания повышенным выпрямленным напряжением кабелей с СПЭ-изоляцией практически бесполезны, так как сшитый полиэтилен обладает высокой электрической прочностью. И нельзя также определить наличие водных триингов в изоляции, так как они не нарушают целостности СПЭ-изоляции.

В международных стандартах МЭК 60502-2, HD 620 для кабелей среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена рекомендуется испытание КЛ проводить переменным напряжением, в том числе пониженной частотой 0,1 Гц, которое по величине не превышает более чем в 3 раза номинальное напряжение КЛ. В качестве альтернативы допускается проводить испытания КЛ постоянным напряжением величиной  $4U_0$  (где  $U_0$  – фазное напряжение) в течение 15 минут (п. 20.2.2 МЭК 60502-2) с характерным примечанием: «испытание напряжением постоянного тока может повредить испытываемую систему изоляции».

Испытания при очень низких частотах со сменой полярности позволяют выявлять дефекты в изоляции без формирования объемных зарядов в структуре полиэтиленовой изоляции как это происходит при приложении постоянного напряжения. Поэтому за рубежом кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена испытываются как правило напряжением сверхнизкой частоты. Такие испытания не влияют на состояние материала изоляции, и кабель не теряет своих свойств.

Еще одной важной стороной эксплуатации КЛ является диагностика их состояния. Все большую популярность приобретают неразрушающие методы диагностики, которые позволяют получать информацию о текущем состоянии изоляции силовых кабелей, не травмируя ее. Ведутся интенсивные исследования по их разработке и внедрению. Наибольших успехов в этом направлении удалось достичь в Германии, США и Японии и в ряде других стран.

Для диагностики КЛ напряжением до 35 кВ за рубежом используются следующие неразрушающие методы диагностики:

- измерение и локация частичных разрядов в силовых КЛ;
- измерение и анализ возвратного напряжения в изоляции силовых кабелей;
- измерение тока релаксации в изоляции СПЭ-кабелей;
- измерение диэлектрических характеристик изоляции кабелей;
- метод импульсной рефлектометрии для предварительной локализации низкоомных повреждений в силовых КЛ и импульсно-дуговой метод для предварительной локализации высокоомных повреждений в КЛ;
- контроль целостности оболочки силовых кабелей и определение мест неисправности в оболочках.

Разработанные за рубежом методы и соответствующее оборудование ориентированы, главным образом, на проведение испытаний и диагностики кабелей с полиэтиленовой изоляцией, которые преимущественно используются в распределительных кабельных сетях зарубежных стран.

Своевременная и достоверная диагностика состояния изоляции силовых КЛ с использованием неразрушающих методов позволит отказаться от профилактических испытаний изоляции разрушающими методами, которые во многих случаях травмируют изоляцию и приводят к снижению остаточного ресурса изоляции силовых КЛ. Испытание изоляции силовых КЛ повышенным напряжением целесообразно проводить при вводе новых КЛ в эксплуатацию, после ремонта КЛ, а также при отсутствии возможности применения средств технической диагностики силовых КЛ неразрушающими методами.

## Выводы

1. Внедрение в электрические сети среднего напряжения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена должно производиться с учетом свойств и характеристик СПЭ-изоляции. Для повышения срока службы кабелей с СПЭ-изоляцией целесообразно создать более «мягкие» условия эксплуатации сети, то есть максимально снизить, а по-возможности исключить высокочастотные воздействия на изоляцию при возникновении электромагнитных переходных процессов, сопровождающих ОДЗ и коммутации вакуумными выключателями. К тому же развитию триингов в СПЭ-изоляции способствует проникновение влаги через повреждения внешней оболочки кабеля, возникших в результате нарушений требований к прокладке и монтажу кабельных линий. К сожалению, такие случаи нередко встречаются на практике.

2. Возникающие в ходе эксплуатации перенапряжения не превышают электрической прочности СПЭ-изоляции как по амплитудному значению ( $3,5U_{фм}$  при ОДЗ,  $4U_{фм}$  и более при коммутациях ВВ), так и в отношении выдерживаемых градиентов высокочастотных импульсов, исходя из норм заводских испытаний (при  $U_{ном} = 10$  кВ  $U_{имп.зав.} = 105$  кВ ( $12,25U_{фм}$ ), (серия из 10 импульсов положительной полярности и 10 импульсов отрицательной полярности на жиле градиент – 87,5 кВ/мкс). Процессы при ОДЗ и коммутациях вакуумными выключателями представляют собой не однократное ВЧ воздействие, а серию импульсов. Число импульсов в серии (переходном процессе) исчисляется десятками. Физико-химические процессы, происходящие в СПЭ-изоляции при та-

ких частых воздействиях, могут приводить к ускоренной ее деградации – *нуждаются в дополнительных исследованиях.*

3. Следует подчеркнуть, что необходимо проведение комплексного экспериментального исследования влияния воздействия серии высокочастотных перенапряжений на скорость старения изоляции кабелей из сшитого полиэтилена. Ввиду нередких нарушений условий прокладки кабелей, ведущих, например, к повреждению внесшей оболочки кабеля и проникновению влаги в кабель, весьма целесообразно провести также испытания образцов СПЭ-кабелей, изъятых из эксплуатации. Такие испытания позволят адекватно оценивать опасность высокочастотных процессов, возникающих в электрических сетях.

4. К наиболее эффективным способам борьбы с высокочастотными воздействиями на современную СПЭ-изоляцию можно отнести изменение режима эксплуатации нейтральной точки сети (резистивное или комбинированное заземление нейтрали), установку RC-цепочек, безиндуктивных конденсаторов, силовых фильтров высших гармонических составляющих. Однако вследствие индивидуальности каждого энергообъекта выбор этих средств и их параметров должен быть подкреплен соответствующими компьютерными расчетами с использованием адекватных математических моделей исследуемых процессов.

Следует отметить, что в сетях с нагрузкой, которая способствует генерации широкого спектра гармоник в напряжении, воздействующих на изоляцию силовых кабелей, нередко стандартная установка силовых фильтров не обеспечивает ограничение колебаний порядка единиц килогерц, которые могут длительно воздействовать на СПЭ-изоляцию кабелей. В этом случае оценку эффективности эксплуатации уже установленных силовых фильтров и необходимости в дополнительных фильтрах можно выполнять путем проведения экспериментальных измерений с последующей обработкой осциллограмм процессов в питающей сети в различных режимах эксплуатации нелинейной нагрузки с применением вейвлет-анализа.

5. В России в настоящее время отсутствует единая точка зрения относительно способа испытания силовых кабелей с СПЭ-изоляцией. С одной стороны, есть международные стандарты, с другой – отечественные требования норм испытаний [5], а с третьей – отдельные инструкции и рекомендации предприятий-изготовителей кабельной продукции. Крайне необходима разработка единой нормативно-технической документации, отвечающей всем современным требованиям к кабельной продукции и разработкам в области ее испытаний и диагностики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Boggs S.A. Mechanisms for Degradation of TR-XLPE Impulse Strength during Service Aging. / S.A. Boggs // Power Delivery. Vol. 17, Issue2, April 2002. – P. 1–6.
2. Кадомская К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. / К.П., Кадомская, Ю.А. Лавров, А.А. Рейхердт. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 368 с.
3. Дьяконов В.П. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник / В.П. Дьяконов, И.В. Абраменкова. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.
5. Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300-97. – 6-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.