

1. Введение

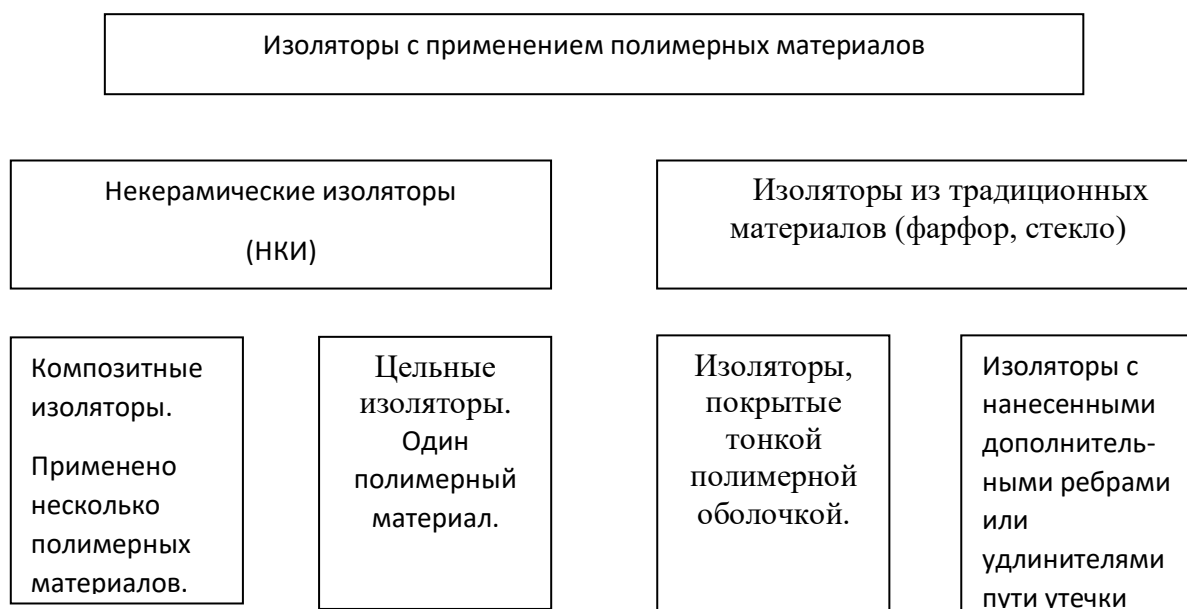
В последние годы производство и применение полимерных изоляторов в электроустановках высокого напряжения во многих странах неуклонно расширяется. В связи с этим возникает необходимость, ознакомления наиболее широкого круга специалистов занимающихся эксплуатацией, ремонтом, строительством и проектированием высоковольтных линий электропередачи и открытых распределительных устройств с кругом вопросов, касающихся опыта эксплуатации, основных характеристик, особенностей конструктивного исполнения, развития производства и рынков сбыта высоковольтных полимерных изоляторов. Рассматриваемый круг вопросов характеризуется, наряду с несомненными достижениями, значительным числом серьезных нерешенных проблем и дискуссионных вопросов. Поэтому изготовители изоляторов очень скупко информируют заинтересованных специалистов о своих достижениях и недостатках, сохраняя в секрете не только детали технологии конструкции изоляторов, но и опыт эксплуатации полимерных изоляторов.

В настоящем обзоре кратко рассмотрены основные конструкции, типы, технологии, материалы применяемые в полимерных изоляторах. Представленная информация должна способствовать лучшему внедрению полимерных изоляторов в электросетевых хозяйствах, правильному применению, созданию новых проектов ВЛ повышенной пропускной способности, внедрению экономичных технологий ремонтных работ на линиях электропередачи под напряжением, созданию надежных изоляторов для ВЛ и контактной сети электрифицированного железнодорожного транспорта и т.д.

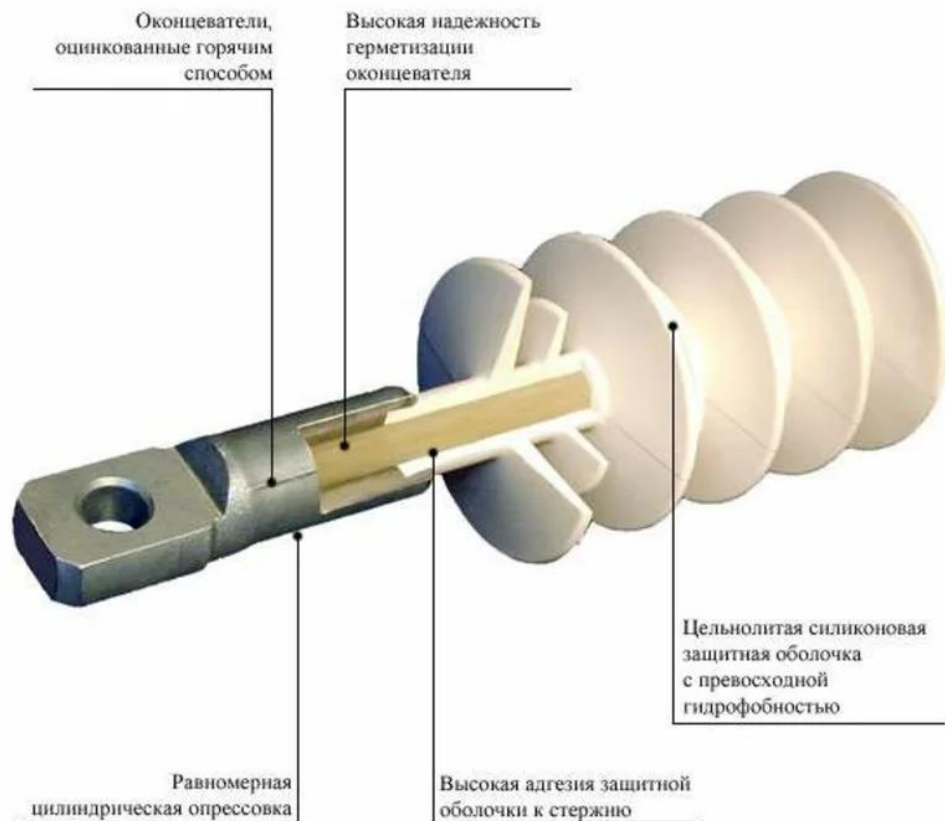
Полимерные (композитные) изоляторы — устройства для изоляции и крепления проводов воздушных линий электропередачи (ВЛ) и распределительных устройств электростанций и подстанций, а также токоведущих частей в электрических аппаратах. Их конструктивные особенности связаны с применением композитных материалов, которые обеспечивают механическую и электрическую прочность, защиту от внешних воздействий и создание необходимой длины пути утечки.

2. Основные определения и термины

Все высоковольтные изоляторы, в которых применяются полимерные материалы можно классифицировать следующим образом:



Полимерные стержневые изоляторы



Наиболее широкое распространение в мире и в России нашли композитные изоляторы (линейные, подстанционные). Стандарт МЭК 1109 (1992) распространяется только на линейные (подвесные и натяжные изоляторы, междуфазные распорки ВЛ) композитные изоляторы. Стандарт МЭК 1109 был разработан первым, и на его основе создавалась основная масса полимерных композитных изоляторов последнего времени. Поэтому далее приводятся определения, взятые непосредственно из стандарта МЭК 1109.

Композитные изоляторы могут состоять либо из отдельных элементов (юбок), смонтированных на стержне с промежуточным слоем или без него, или из оболочки, отлитой цельно (или из нескольких элементов) непосредственно на стержне.

Стержень композитного изолятора представляет из себя его внутренний изолирующий элемент, предназначенный для обеспечения заданных механических характеристик изолятора. Стержень обычно изготавливается из смолы, армированной стекловолокнами, размещенными в матрице смолы таким образом, чтобы обеспечивалась максимальная разрывная прочность изолятора. Однако некоторые фирмы вместо стеклопластика применяют и другие изоляционные материалы с большой прочностью на разрыв.

Оболочка, являющаяся изолирующим элементом, обеспечивает необходимую длину пути утечки и защищает стержень от атмосферных воздействий.

Промежуточный слой (подслой) изготавливается из изолирующего материала, необходим для улучшения адгезии материала оболочки и материала стержня, изоляции поверхности раздела разных полимерных материалов.

Юбка является выступающим элементом оболочки, предназначенным для увеличения длины пути утечки, может быть гладкой или ребристой.

Поверхности раздела (границы) между различными материалами. В большинстве композитных изоляторов присутствуют следующие поверхности раздела: стекловолокно - пропиточная смола ; частицы наполнителя - полимер ; юбка - юбка ; промежуточный слой - юбка ; оболочка - стержень и металлическая арматура.

Металлическая арматура (оконцеватели) предназначена для соединения композитного изолятора с проводом, несущей конструкцией (например, опора ВЛ), элементом электрооборудования (например , шинной опоры) или с другим изолятором.

Трекингом называется невосстановимое разрушение вследствие формирования проводящих дорожек, начинающихся и развивающихся на поверхности изолирующего материала (оболочка, стержень). Эти дорожки являются проводящими даже при сухих условиях. Трекинг может происходить на поверхностях, контактирующих с воздухом, а также на поверхностях раздела между различными изоляционными материалами.

Эрозией называется невосстановимое и непроводящее разрушение поверхности изолятора, происходящее в результате утраты материала. Эрозия может быть равномерной, локализованной или древоподобной.

Известкованием(мелованием) называется появление частиц наполнителя из материала оболочки и образование шероховатой или порошкообразной поверхности. При этом поверхность оболочки изолятора может резко менять свой цвет, например, на белый у кремнийорганических изоляторов.

Трещинообразование представляет собой поверхностные микро - разрушения глубиной 0,01 - 0,1 мм.

Трещиной называется любое разрушение поверхности глубиной более 0,1 мм.

Гидролизом называются явления , обусловленные проникновением воды или её паров в изоляционные материалы композитного изолятора, что может привести к электрическому и/или механическому разрушению (коррозия - гидролиз при проникновении химически агрессивных веществ).

Изменение цвета защитной оболочки под воздействием напряжения и факторов окружающей среды свидетельствует о начальной стадии старения изоляторов.

В МЭК 1109) указано , что неглубокие бороздки на поверхности , обычно древовидные , могут образовываться на композитных изоляторах (как и на обычных изоляторах) , после частичных перекрытий. Эти следы не являются повреждениями и не вызывают каких-либо последствий до тех пор, пока они не становятся электропроводящими. Когда они начинают проводить ток, их рассматривают как трекинг.

В России и за рубежом наиболее часто применяются следующие материалы защитной оболочки полимерных изоляторов (в скобках приведены принятые в литературе обозначения) :

- кремнийорганическая резина , силиконовые эластомеры (силиконы) различной модификации (SIR);
- этилен-пропилен-диен-мономер (EPDM) ;
- этиленпропиленовый эластомер (EPR) ;
- этилен виниловый ацетат (EVA) ;
- циклоалифатические эпоксидные смолы, эпоксидные компаунды;
- политетрафторэтилен , тефлон (PTFE) , изофлон , модифицированные фторопласты ;
- полиуретаны;
- модифицированный полиолефин, полиолефиновые композиции. В дальнейшем изложении наименования материала оболочек могут даваться в латинской аббревиатуре.

Так как в России наибольшее распространение получили композитные изоляторы, им будет уделяться наибольшее внимание. Если нет особых оговорок, вся остальная информация касается именно полимерных композитных изоляторов.

Хотя указанные принципиальные отличия в исполнениях полимерных изоляторов и в применяемых в них материалах дают существенную информацию об их конструкции , используемые модификации материалов и деталей конструкции композитных изоляторов , применяемые различными изготовителями , могут быть очень разными.

3. Основные российские и зарубежные производители полимерных изоляторов

Основными производителями линейных (подвесных и опорных) композитных изоляторов в настоящее время являются следующие фирмы :

в России

ЗАО «Завод полимерных изоляторов»

ОАО «Завод слоистых пластиков»

ЗАО «Полимеризолятор»

ОАО «ПромАрматура»

ЗАО «Арматурно-изоляционный завод», Лыткарино

на Украине

НИИ ВН. Экспериментальное производство.

АО «АИЗ-Энергия»

- в США

Ohio Brass * (силикон и EPDM , опорные и подвесные 15 - 765 кВ);

Sediver * (подвесные 15 - 765 кВ , опорные 15 - 500 кВ);

Lapp Insulator Company * (силикон и EPDM , подвесные 15 - 765кВ, опорные 15 - 500 кВ);

Raychem * (модификация полиолефина , подвесные 15 - 138 кВ ,

опорные 15 - 35 кВ);

Locke Insulators * (до 500 кВ);

C - K Composites *;

Reliable Power Products * (подвесные 69-765 кВ , опорные 15-345 кВ);

W.H. Salisbury * (подвесные 15 - 161 кВ , опорные 15 - 69 кВ).

- в Канаде

K - Line Insulators * (силикон и EPDM , подвесные до 230 кВ ,

опорные до 35 кВ);

Electric Power Accessories (Sediver) *.

- во Франции

Sediver * (EPDM, подвесные 15 - 735 кВ, опорные 15 - 345 кВ);

LERC S.A. (до 25 кВ).

- в Италии

Rebosio Industria Elettrotecnica * (PTFE , НТВ силикон , 24-380 кВ);

Pirelli Servocavi * (подвесные и опорные 3 - 150 кВ).

- в Германии

Hoechst Ceram Tech *;

Siemens A G.

- в Швейцарии

Sefag * (до 500 кВ).

- в Венгрии

Furukawa Electric Composite * (силикон, подвесные 10 - 750 кВ, опорные 110 - 420 кВ).

- в Норвегии

EgoTech * (подвесные 24 - 145 кВ , опорные 24 - 36 кВ) ;

Ensto Energi * .

- в Бразилии

Electrovidro (Sediver) * (до 500 кВ).

- в Австрии

Kuvag Kunststoffverbeitungs * (циклоалифатическая эпоксидная смола (до 70 кВ).

- в Финляндии

Oy Sekko Ab (только линейные опорные изоляторы 11 - 36 кВ).

Фирмы , отмеченные выше звездочкой , выпускают наряду с подвесными также линейные опорные изоляторы (композитные или эпоксидные).

Об изготовлении подстанционных опорных композитных или эпоксидных изоляторов и покрышек сообщают фирмы C-K Composites , EgoTech , Electrovidro , Hoechst Ceram Tech , K - Line Insulators , Lapp Insulator Company , Ohio Brass , Raychem , Rebosio Industria Elettrotecnica , Reliable Power Products , W.H. Salisbury , Sediver (Франция, США) , Mekufa (Голландия) , Siemens AG (Германия).

Об изготовлении композитных или эпоксидных проходных изоляторов (вводов) сообщают фирмы C- K Composites, Hoechst Ceram Tech , Kuvag Kunststoffverbeitungs , Lapp Insulator Company , Mekufa , Raychem , Sediver (Франция , США) , GEC Henley (Великобритания) , Isola Werke , Georg Jordan и MWB High Voltage Systems (Германия) , Reuel (США) .

Об изготовлении ограничителей перенапряжения в полимерной (композитной) оболочке сообщают фирмы Российские C-K Composites , Furukawa Electric Composite Insulator , GEC Henley , Kuvag Kunststoffverbeitungs , Pirelli Servocavi , Raychem.

Кроме того многие фирмы выпускают полимерные изоляторы для кабельных муфт , электрифицированных железных дорог и т.д.

Кремнийорганические покрытия для их нанесения на фарфоровые и стеклянные изоляторы выпускают фирмы CSL Silicones (Канада) , Dow Corning и Polytech Services (США) , Wacker Silicones (США и Германия) , Giba - Geigy , Polymer Div. (Швейцария) .

4. Основные конструктивные особенности полимерных изоляторов.

В СССР начиная с 1979 года сначала в Научно-исследовательском институте высоких напряжений, а в последствии в КБ по высоковольтным изоляторам и линейной арматуре разработаны полимерные изолирующие конструкции различного назначения:

стержневые изоляторы и гирлянды классов нагрузки 70, 120, 160, 300 кН напряжением 35-1150 кВ для районов с чистой и загрязненной атмосферой;

изоляторы и гирлянды классов нагрузки 70 и 160 кН для проведения ремонтных работ без отключения ВЛ напряжением 35-1150 кВ;

междуфазовые изолирующие распорки для ВЛ напряжением 35-330 кВ;

изолирующие траверсы для ВЛ напряжением 10-220 кВ

Линейные изоляторы до напряжения 500кВ включительно выполнены в виде одного элемента, на напряжение 750 кВ и 1150 кВ применяется гирлянда, состоящая из двух изоляторов на напряжение 330 кВ и 500кВ соответственно.

Основными достоинствами композитных изоляторов являются резко сниженный вес, улучшенные в сравнении с изоляторами из керамики и стекла механические и электрические характеристики, стойкость к вандализму , удобство транспортировки и монтажа, возможность использования для компактизации электроустановок, хорошая работоспособность в условиях загрязнения.

Несмотря на внешнюю простоту, композитные изоляторы представляют собой достаточно сложную составную конструкцию, подвергаемую комбинированным механическим и электрическим нагрузкам и воздействиям окружающей среды.

Стержень (сердечник) изоляторов выполняет двойную роль, обеспечивая изоляцию и неся механическую нагрузку, причем он может работать как на растяжение и изгиб , так и на кручение и сжатие. У линейных подвесных и опорных композитных изоляторов центральный стержень состоит из аксиально-ориентированных (вдоль оси изолятора) стеклянных нитей, скрепленных вместе посредством эпоксидной смолы. Семьдесят пять процентов веса стержня составляют нити мало-щелочного стекла типа Е. Диаметр нитей лежит в пределах от 5 до 20 мкм. Смола может быть полиэфирной или эпоксидной. Хотя эпоксидная смола считается более надежной, но из-за более низкой цены чаще всего применяют полиэфирные смолы. Стеклопластиковые стержни различных диаметров и длины изготавливаются путем протяжки через обогреваемую формующую фильеру стеклоровинга, предварительно пропитанного эпоксидным компаундом.

У подстанционных опорных изоляторов и вводов стержень состоит из намотанной стеклопластиковой трубы. Незащищенный стержень практически непригоден для длительного наружного применения из-за развития трекинга при воздействии загрязнения, влаги и рабочего напряжения. Для защиты стержня от внешних воздействий на него различными способами наносятся защитные оболочки из различных полимерных материалов, в подавляющем большинстве случаев снабженные ребрами для обеспечения максимальной электрической прочности.

В настоящее время только три класса материалов широко используются в оболочках композитных изоляторов:

- эпоксидные смолы (компаунды) ;
- углеводородные эластомеры; (ЗАО «Полимеризолятор»)
- силиконовые эластомеры (ОАО «ПромАрматура», «Энергия XXI» и др.)

Отдельные фирмы производят изоляторы и с другими материалами защитной оболочки , указанными в разделе 2.

Ранние эпоксидные смолы , впервые примененные в высоковольтных изоляторах наружной установки за рубежом (США) в 1959 г. , изготавливались на основе бифенола А - типа с большим наполнением кварцем. Такие изоляторы были твердыми и ломкими, на них в эксплуатации наблюдался трекинг. Для увеличения эластичности в материал добавлялись различные виды пластификаторов, что приводило к гидролизу, из-за которого происходила деполимеризация смолы. Из-за подверженности, вследствие

указанных факторов, электрических трекам и слабой устойчивости к ультрафиолетовому (УФ) излучению, бифеноловая А-типа эпоксидная смола впоследствии была повсеместно заменена на эпоксидную смолу циклоалифатического типа с использованием в качестве наполнителя гидрата алюминия. В настоящее время изоляторы из циклоалифатических смол различной модификации применяются за рубежом в распределительных сетях напряжением до 69 кВ (вводы аппаратов, изоляторы шинопроводов, корпуса трансформаторов тока). В обычных условиях их характеристики в целом вполне удовлетворительны, но они не пригодны для эксплуатации в условиях загрязнения.

Этиленпропиленовые резины (EPR) в настоящее время широко используются для наружной изоляции, а именно две модификации этилен- пропиленового мономера (EPM , EPDM) и сополимер этилен- пропилена и силикона (ESP). Все три типа имеют высокую степень заполнения гидратом алюминия или другими наполнителями. Ранние типы EPR подвергались трекингу с образованием проводящих углеродных дорожек на поверхности и имели слабую устойчивость к УФ излучению. Треки развивались древовидно, пока весь изолятор не был ими зашунтирован, что приводило к перекрытиям. Современные EPR более устойчивы к треку и УФ лучам и характеризуются только небольшими изменениями поверхности в эксплуатации. Изоляторы с оболочками из EPR пригодны для электроустановок класса напряжением до 765 кВ. Их длительные характеристики для чистых районов вполне удовлетворительны. При работе в условиях загрязнения характеристики оболочек из EPR неоднозначны, но чаще всего они неудовлетворительны. Для оценки характеристик применяемых сравнительно недолгое время оболочек из ESP необходимо накопить опыт эксплуатации.

Силиконовые эластомеры (SE) или кремнийорганические резины (SIR) для наружной изоляции применяются трех типов :

- вулканизированные при комнатной температуре (RTV);
- жидкая силиконовая резина (LSR);
- вулканизированные при высокой температуре (HTV).

Оба вулканизированных типа (RTV и HTV) имеют высокое заполнение гидратом алюминия и обожженным кремнеземом (окись кремния) и оба этих типа по большинству публикаций проявили себя как наиболее надежные полимерные материалы для наружной изоляции (отдельные отступления от этого мнения приводятся в дальнейшем изложении). Резина LSR ещё только начинает применяться, хотя и в во всё возрастающих объёмах. Первые SE были применены в 1965 г. в подвесных изоляторах (RTV с наполнением кварцем). Применение этих оболочек в целом было успешным, постепенно для изоляторов, предназначенных для работы в районах с загрязненной атмосферой, начали применять в качестве наполнителя гидрат алюминия, а с 1979 г. начали выпускать подвесные изоляторы с оболочками из HTV силикона. Эластомеры RTV применяют обычно на подстанционных изоляторах, их характеристики в загрязненных районах в большинстве случаев оказались весьма хорошими.

В отличие от большинства других полимерных изоляционных материалов силиконовые эластомеры способны сохранить свою низкую поверхностную энергию, что обеспечивает их отличные гидрофобные поверхностные свойства (подробнее см. об этом в разделе 20). Кроме того, в отличие от EPР, силиконовые эластомеры устойчивы к солнечным УФ лучам. Опыт эксплуатации показал, что, как правило, обмыв загрязненной SE - изоляции так часто, как для фарфоровых или других некерамических изоляторов не требуется, а во многих случаях обмыв вообще не нужен. В целом в настоящее время за рубежом наметилась тенденция использовать SE для оболочек всех типов наружных изоляторов. Разработчики стремятся к стандартизации, как это сделано для керамических изоляторов, причем более дешевые модификации силикона будут использоваться под общим названием " силикон " по аналогии с кварцевым фарфором, используемым для низких напряжений. Этот тип фарфора имеет худшие характеристики по сравнению с алюминиевым фарфором, используемым для высоковольтных изоляторов, хотя оба этих типа изоляторов называют фарфоровыми.

Конфигурация юбок, используемая в композитных изоляторах, весьма разнообразна. На первых изоляторах юбки делали ребристыми по образцу фарфоровых длинностержневых подвесных изоляторов. Применялась также конусная форма юбок для обеспечения большой длины пути утечки. Юбки такой конфигурации легко удаляются из отливочной формы, когда отливаются поштучно. Однако с переходом от модульных отливок к цельно отливаемой оболочке форма применяемых юбок стала у большинства фирм слабо конической (почти плоской и горизонтальной), главным образом для обеспечения изъятия её без повреждений из отливочной формы. В последние годы фирмы чаще всего применяют гладкие профили юбок, лучше очищаемые от загрязнения ветром и осадками. Большинство фирм предлагает композитные изоляторы, как с постоянным, так и с переменным вылетом ребер.

В настоящее время большинство передовых зарубежных фирм для повышения срока службы изоляторов, особенно для более высоких напряжений, отказалось от модульной отливки и перешло на отливку оболочек, вулканизируемых на стержне целиком (за один технологический цикл), чаще всего с применением термопластавтоматов и устройств. Причин для такого перехода существует несколько. В модульных оболочках из-за короны в пространстве между юбками и эрозии, вызванной поверхностными разрядами, часто образуются микропроводящие каналы между отдельными юбками, что приводит к выходу их из работы. В нескольких известных случаях такие каналы проникали непосредственно до стеклопластикового стержня и были причиной его трекинга. Кроме того в модульных конструкциях для заполнения воздушных полостей между юбками используются соединительные компаунды (силиконовая мазь, силиконовый гель), которые выделяют масло, способствующее накоплению загрязнений на стыках между юбками. Герметики типа эпоксидных смол не образуют постоянной связи с эластомерными материалами, поэтому модульные соединения механически разделяются за короткий период времени из-за влияния влаги. Наконец, некерамические изоляторы с модульными юбками не могут обмываться водой под высоким давлением, и поэтому не должны использоваться в тех загрязненных районах, где требуется обмыв.

Индивидуально сформированные юбки или группы юбок, насаживаемые на стержень изолятора, обычно имеют меньший внутренний диаметр, чем диаметр стержня. Посадка таких юбок на стержень чаще всего производится за счет трения (натяжкой), при этом снижается количество компаунда (подслоя), необходимого для заполнения воздушного промежутка между стержнем и оболочкой. Это приводит к механическим (“обручным”) растягивающим нагрузкам в юбках и уменьшает срок службы изоляторов. УФ лучи солнца в некоторых полимерах, например в EPR, также могут вызвать разрыв связи между юбками, приводя к образованию микроскопических трещин. Обычно эти трещины сильно распространяются в глубину из-за наличия органических и неорганических УФ ингибиторов, которые введены в материал. Поэтому рассматриваемые трещины не обязательно сокращают срок службы изоляторов, но у модульных юбок при воздействии на них механических (“обручных”) нагрузок эти трещины постепенно увеличиваются и могут вызвать разрушение юбок. При наличии “обручных” нагрузок воздействие короны также ускоряется.

Арматура (оконцеватели) композитных изоляторов изготавливается из литого, штампованного алюминия, ковкого чугуна или стали. Для обеспечения необходимой механической прочности оконцеватели прикрепляются к стержню различными способами - опрессовкой, заливкой эпоксидным компаундом, реже использованием металлического клина. Когда опрессовка производится равномерно по окружности оконцевателя, изолятор имеет лучшие характеристики, чем при использовании клееного конического оконцевателя (имеет большую разрывную прочность на единицу поперечного сечения сердечника). Однако, если обжимающая пресс- форма изношена или используется только двухсторонняя опрессовка шестигранной матрицей, может произойти излом стержня изолятора. Наиболее хорошая заделка стержня изолятора в оконцевателях происходит при опрессовке круглой матрицей методом вытяжки. В этом случае в стержне изолятора не образуются микротрещины. Эти трещины, как правило, не могут быть обнаружены при приемочных испытаниях, а дефект проявляется уже в эксплуатации. Такую заделку используют в России фирмы (ЗАО «ПромАрматура», ЗАО «Арматурно-изоляторный завод», ЗАО «НПО «Изолятор»). В клиновых, редко применяемых, конструкциях оконцевателей создаются механические нагрузки, передающиеся к центру стержня. Они могут привести к образованию в сердечнике трещин при весьма малых крутящих нагрузках. Изоляторы с такими оконцевателями требуют особой осторожности при монтаже и эксплуатации. Напротив обжатые и клееные конструкции оконцевателей имеют высокую прочность на скручивание.

При перекрытии изолятора силовой дугой на оконцевателях, где располагаются опорные точки дуги, концентрируется тепло. У конструкций с обжатием при нагреве оконцеватели расширяются, поэтому их соединение со стержнем ослабляется. В клеевых эпоксидных конструкциях разложение клеевой части является типичной причиной повреждения. В клиновой конструкции нагрев стержня приводит к повреждению в результате расклинивания. На многих конструкциях оконцевателей устанавливаются дополнительные металлические диски (кольца) предохраняющие оконцеватели от высококонцентрированной в опорных точках тепловой энергии дуги. Изоляторы более высоких

классов напряжения снабжаются защитной арматурой для выравнивания распределения напряжения. Однако в некоторых случаях эта арматура может сильно повреждаться от действия силовой дуги. Если такое кольцо не заменить сразу после его повреждения, это может привести в очень короткое время к серьезным «коронным» повреждениям в изоляторе. Кроме того в таких случаях возникают сильные радио- и телевизионные помехи. Выявлено, что, если последствия дугового повреждения защитной арматуры ликвидированы достаточно быстро, механическая прочность изоляторов не изменяется. Однако, если повреждения происходят повторно на уже имевшей повреждения защитной арматуре, может произойти разрыв изолятора с падением провода. Дополнительные данные по этому вопросу рассмотрены в разделе 10.

В настоящее время признается, что концевая заделка, т.е. соединение оконцевателей и защитной оболочки, является наиболее важным элементом композитного изолятора с точки зрения обеспечения его безаварийной длительной работы. Из-за нарушения целостности (герметичности) неоднократно происходили тяжелые аварии в эксплуатации, вызванные разрывом стеклопластикового стержня, входившего в контакт с атмосферными загрязнениями и влагой. Основной причиной таких разрывов стеклопластикового стержня был трекинг по увлажненной поверхности. При этом изоляторы, в которых используется клиновое присоединение металлических оконцевателей к стержню, имеют, как правило, наименее надежные концевые заделки. Перемещение стержня внутри оконцевателя в таких конструкциях приводит к смещению оболочки относительно оконцевателя, в результате чего стержень может оказаться незащищенным. Основными применяемыми в настоящее время типами заделки являются клеевая, фрикционная (трение) и формовочная. Заделки клеевого типа, выполняемые с использованием замазочного материала (герметика), такого как силиконовая резина RTV, из-за плохой адгезии недолговечны. Заделки фрикционного типа, в которых стержень с трением вводится в оконцеватель, работают эффективно до тех пор, пока сохраняются размерные допуски, и на практике не вызывали каких-либо проблем, обеспечивая отсутствие перемещения оконцевателей. Концевые заделки, выполненные формовкой стержня в оконцеватель, являются наилучшими, поскольку при формовке образуется прочное физическое скрепление стержня, оконцевателя и оболочки.

5. Опыт эксплуатации полимерных изоляторов.

Достаточно широкий опыт эксплуатации некерамических изоляторов первого поколения (1970 - 1985 гг.) в целом был не очень благоприятным, наблюдались трек и эрозия защитной оболочки, хрупкий излом стеклопластикового стержня и другие повреждения. Это приводило во многих случаях как к перекрытиям изоляторов, так и к тяжелым авариям, в том числе с падением проводов на землю.

В результате произошедших повреждений и аварий многие производители перестали выпускать некерамические изоляторы или стали выпускать их только для распределительных электрических сетей сравнительно низкого напряжения. Однако

некоторые фирмы пошли по пути улучшения конструкции изоляторов и технологии их изготовления. На основе этих работ в 1985 - 1990 гг. многие зарубежные производители освоили выпуск усовершенствованных композитных изоляторов второго (некоторые авторы считают - третьего) поколения.

Последний обобщенный доклад об опыте эксплуатации полимерных изоляторов в сетях высокого напряжения переменного тока опубликован в 1990 г. рабочей группой 03 . 01 исследовательского комитета 22 СИГРЭ / 3 /. К данным , полученным рабочей группой СИГРЭ , в / 3 / добавлены данные , полученные независимым опросом Канадской электротехнической ассоциацией и научно-исследовательским институтом EPRI (США). Вопросники были направлены в эксплуатирующие организации в 1987 г. и касались опыта эксплуатации полимерных изоляторов на конец 1986 г. в электроустановках напряжением 100 кВ и выше. На вопросник ответило 7 эксплуатирующих организаций Австралии , 11 Канады , 14 Европы (без б. СССР) , 2 Латинской Америки , 1 Южной Африки и 124 США. Эта статистика (хотя ответили не все организации , эксплуатирующие полимерные изоляторы) отражает значительно более широкое применение полимерных изоляторов в Северной Америке (с 1960 г.) , чем во всех других частях мира. В табл. 1 дана оценка причин применения изоляторов эксплуатационниками (без градаций по типам изоляторов). Так как ряд организаций назвал одновременно несколько причин , сумма ответов не равна 100 %. Из табл. 1 следует , что нет единой причины применения полимерных изоляторов, но в любом случае экономические причины не являются доминирующими.

Данные об общем числе примененных в эксплуатации изоляторов по всем классам напряжения приведены в табл.2. Кроме того приведены данные по числу (шт.) эксплуатируемых изоляторов по классам напряжения (100-200 кВ, 200-300 кВ, 300-500 кВ , более 500 кВ), которые суммарно по всем странам сведены в табл.3. В табл.2 и 3 объём опыта эксплуатации представляет собой произведение количества эксплуатируемых изоляторов на длительность их эксплуатации (“изоляторолет“) и приводится в скобках под числом изоляторов. Из приведенных данных следует, что по состоянию на 1986 г. общая доля установленных на ВЛ напряжением свыше 100 кВ полимерных изоляторов была сравнительно невелика. Всего на рассматриваемых ВЛ к рассматриваемому времени было установлено около 135 тыс. шт. полимерных изоляторов , из них 93 тыс. шт. (около 70 %) - в США. По данным изготовителей к этому времени изготовлено около 288 тыс. шт. соответствующих изоляторов , т.е. в эксплуатации на ВЛ было установлено только около половины всех изготовленных изоляторов. Из рассмотренных данных с большой долей приближения можно сделать вывод, что за рубежом к 1986 г. на ВЛ напряжением 100 кВ и выше было установлено примерно столько же полимерных изоляторов , что и в России в 1995 г. (данные НИИПТ), т.е. в рассматриваемом отношении наше отставание от остального мира - примерно 10 лет , но отдельные страны , кроме США , по общему числу установленных полимерных изоляторов Россия уверенно обгоняла к 1997 году. Данные, приведенные в табл. 2 и 3 , соответствуют среднему сроку эксплуатации полимерных изоляторов 6 лет. Всего по состоянию на 1986 г. в классах напряжения 100-200 кВ на ВЛ за рубежом работало около 82 тыс. шт.

{ 60 %) всех изоляторов , 200-300 кВ - около 32 тыс. шт. (23 %) , 300-500 кВ - около 19 тыс. шт. (14 %) , 500 кВ и выше - около 4 тыс. шт. (3 %) всех изоляторов. Практически все изоляторы на ВЛ напряжением 500 кВ и выше применены в США и Канаде. Для сопоставления отметим, что последняя оценка количества полимерных изоляторов , внедренных в эксплуатацию в б. СССР и в России (по состоянию на 1994-1995 гг.) приведена в / 8 /. В табл. 4 указано число изоляторов, установленных на ВЛ , работающих в особых эксплуатационных условиях (по странам мира), а в табл. 5 те же данные приведены суммарно по всем странам мира в зависимости от номинального напряжения ВЛ. Зоны загрязнения (I-IV) даны в соответствии со стандартом МЭК 815 (1986 г.) / 9 /.

Таблица 1

Причины применения полимерных изоляторов в эксплуатации (%)

Причина	Австралия	Канада	Европа	Латинская Америка	Южная Африка	США	По всем странам
Поведение в условиях загрязнения	57	43	36	0	100	10	27
Антивандалные свойства	43	43	0	100	100	45	38
Удобство транспортирования	43	43	29	100	0	24	32
Хорошие механические и весовые характеристики	29	0	21	0	0	24	20
Низкая стоимость	43	14	0	0	0	7	10
Внешний вид (дизайн)	29	14	0	0	0	17	13
Прочее	43	14	29	50	100	17	25

Таблица 2

Общее число эксплуатируемых на ВЛ за рубежом полимерных изоляторов , шт (1986 г.)

Тип изолятора	Австралия	Канада	Европа	Латинская Америка	Южная Африка	США	Всего
Подвесной	3986 (31458)	5617 (37827)	9671 (81107)	3272 (11083)	5100 (45700)	52380 (322134)	82028 (529314)
Натяжной	1433 (12900)	1178 (4515)	3718 (23662)	600 (1800)	3000 (23700)	9178 (45717)	19105 (112394)
Линейный опорный	1514 (4711)	2047 (7851)	56 (195)	0 (0)	400 (3600)	32112 (172731)	36129 (189096)

Таблица 3

Общее число эксплуатируемых на ВЛ разного класса напряжения за рубежом полимерных изоляторов , шт. (1986 г.).

Тип изолятора	100 - 200 кВ	200 - 300 кВ	300 - 500 кВ	500 кВ и выше
Подвесной	43281 (304089)	21710 (131694)	13523 (73215)	3512 (20316)
Натяжной	10391 (67861)	3104 (18663)	5030 (24448)	580 (1422)
Линейный опорный	28414 (150437)	7313 (36660)	380 (1882)	22 (117)

Таблица 4

Число изоляторов , эксплуатируемых в особых условиях (по странам).

Условия эксплуатации	Австралия	Канада	Европа	Латинская Америка	Южная Африка	США	Всего
Высота более 1000 м н.у.м.	0	864	664	0	0	4542	6070
Влажность воздуха более 85 %	340	80	652	3000	0	580	4652
Ультрафиолетовое излучение среднее сильное	0 1961	1307 364	1342 676	0 3000	0 0	1558 5996	4205 12497
Морское загрязнение , степень							
I							
II	2393	0	779	0	0	520	3792
III	1096	237	546	50	0	102	2033

IV	540 18	24 27	56 151	72 0	1200 0	22 3	1924 199
Промышленное загрязнение , степень							
I			597			0	
II			396				
III	90	388		0	0		1284
IV	1	318		17	20		5944
	6	12		0	40		3705
	0	33		10	0		973

Таблица 5

Число изоляторов , эксплуатировавшихся в особых условиях на ВЛ различных классов напряжения.

Условия эксплуатации	100-200 кВ	200-300 кВ	300-500 кВ	500 кВ и выше
Высота более 1000 м н.у.м.	2110	3095	3133	126
Влажность воздуха более 85 %	250	670	3652	80
Ультрафиолетовое излучение				
среднее	2739	13	149	1304
сильное	2768	3435	6168	126
Морское загрязнение , степень				
I	3363	0	429	0
II	1975	0	58	0
III	662	20	1242	0
IV	69	28	10	28
Промышленное загрязнение , степень				
I	503	30	14	637
II	2050	1819	1757	318
III	1832	1433	440	0
IV	308	564	101	0

Из приведенных данных можно сделать следующие выводы. В районах с морскими загрязнениями было установлено около 8 тыс. шт. изоляторов (5,8 %), в районах с промышленными загрязнениями - около 12 тыс. шт. изоляторов (8,7 %), а всего в загрязненных районах - 14,5 % всех изоляторов. Это примерно соответствует доле протяженности ВЛ в загрязненных районах по отношению к протяженности всех ВЛ в статистически среднем крупном регионе с разнообразными условиями работы изоляции. Сопоставительные данные по работе полимерных изоляторов в районах с различными условиями загрязнения в б. СССР и России приведены в / 8 /. По данным табл. 4 и 5 в

районах с I , II , III степенями загрязнения применено примерно по одинаковому количеству полимерных изоляторов (по 25 - 40 % от их общего числа в загрязненных районах) и только в районах с очень тяжелыми загрязнениями (IV степень) полимерные изоляторы применяют в значительно меньшем объеме {примерно 6 % от всех изоляторов , установленных в загрязненных районах }. Можно также сделать вывод о том , что в районах с природными и промышленными загрязнениями объем внедрения полимерных изоляторов приблизительно одинаков. Важно отметить , что более 50 % всех изоляторов в загрязненных районах применено на ВЛ напряжением 100 - 200 кВ. На всех приведенных оценках негативно сказывается то обстоятельство , что не учтен материал защитной оболочки изоляторов , т.е. весь опыт эксплуатации просуммирован независимо от типа изоляторов. Кроме того не учтен особенно обширный опыт эксплуатации ВЛ напряжением до 100 кВ. В какой-то мере эти недостатки будут устранены в дальнейшей части настоящего обзора , где по возможности более конкретно будет дан опыт применения полимерных изоляторов в различных странах. Следует также подчеркнуть , что особо широкое внедрение полимерных изоляторов в ряде стран происходило в 1987 - 1996 гг. , но соответствующего обобщения опыта эксплуатации за рубежом ещё не опубликовано.

6. Некоторые вопросы эксплуатации зарубежных полимерных изоляторов.

Зарубежные эксплуатационные организации сообщают о проводимых ими регулярных осмотрах с заданной периодичностью эксплуатируемых некерамических изоляторов с целью принятия необходимых мер (чистка изоляторов , их демонтаж для исследований или замены и т.д.).

Первоначально считалось , что в чистке (обмыве) некерамических изоляторов в процессе эксплуатации нет необходимости. В настоящее время за рубежом повсеместно признается, что периодическая чистка необходима для продления срока службы изоляторов. При этом перед чисткой эксплуатационники должны получить консультацию производителей об их продукции. Большинство конструкций может подвергаться сухой чистке, например , обдувом абразивным материалом (в США чаще всего измельченной кукурузой), однако далеко не все типы некерамических изоляторов могут обмываться водой под высоким давлением. В частности , как уже указывалось , у изоляторов с модульной сборкой юбок после обмыва высоким давлением может происходить трекинг стеклопластикового стержня.

В США в действующие Руководящие указания IEEE по чистке изоляторов внесен проект раздела , касающийся обмыва высоким давлением некерамических изоляторов с оболочками из EPDM или EPDM / EPR отдельно для модульно и цельно отлитых изоляторов. Обмыв силиконовых изоляторов по этим рекомендациям должен производиться только при низком или среднем давлении. Дальнейшее изложение вопросов эксплуатации некерамических изоляторов в основном построено на основе указанного американского руководства. При обмыве некерамических изоляторов струя воды должна перемещаться в направлении сверху вниз. К сожалению эти рекомендации не всегда можно реализовать в эксплуатационных условиях на ВЛ , т.к. некерамические изоляторы часто взаимозаменялись и на расстоянии нелегко установить тип оболочки.

Как правило , выбор метода обмыва производится на месте руководителем бригады. Перед установкой в эксплуатацию новые некерамические изоляторы обычно не требуют очистки. Однако , если они запылились при хранении , достаточно обтереть их влажной тряпкой. Если новые изоляторы перед установкой очень грязные и обтирание влажной тряпкой недостаточно , то может быть использован слабый раствор очистителя , но потом он должен быть тщательно удален с поверхности чистой водой. Применять для чистки некерамических изоляторов какие-либо растворители не рекомендуется. В некоторых районах на эксплуатируемых изоляторах может образоваться плотный слой загрязнения , который может быть удален обмывом слабым раствором отбеливающей хлорной жидкости (1 часть на 4 части воды). Обмыв может сопровождаться легким поскребыванием ветошью или мягкой щеткой и производиться легким обрызгиванием изолятора раствором из ручного пульверизатора. При этом необходимо обеспечить неповреждаемость концевой заделки изолятора. После чистки изолятор должен быть тщательно обмыт чистой водой. При монтаже изоляторов необходимо исключить контакт поверхности изолятора с острыми (режущими) предметами и с абразивными поверхностями. Изоляторы при этом должны подниматься за оконцеватели. Полимерные опорные изоляторы могут быть осторожно подняты в горизонтальном положении двумя нейлоновыми ремнями , при этом следует избегать возникновения изгибающих усилий. Если на устанавливаемом в эксплуатацию изоляторе имеются зарубки , посечки или вдавливания поверхности , изолятор необходимо отложить для внимательной проверки и возможного ремонта. Изоляторы даже со слабо обнаженным стеклопластиковым стержнем должны быть забракованы и заменены. С земли серьезные повреждения от стрельбы легко видны невооруженным глазом , но для обнаружения слабого повреждения стержня обычно требуется бинокль. Эти изоляторы также должны быть заменены , т.к. дефект может прогрессировать из-за воздействия влаги и привести к поломке или трекингу стеклопластикового стержня. В некоторых конструкциях при эксплуатации могут возникнуть трещины юбок и /или оболочки вследствие воздействия УФ лучей , токов утечки или короны. Эти изоляторы должны быть заменены. Повреждения из-за перекрытий в большинстве случаев трудно выявить с земли , хотя иногда повреждения очевидны и ясно , что изолятор должен быть заменен. Как правило , юбки или оболочки не повреждаются , пока не произойдет электрический пробой изолятора , например , в случае излома стержня. В этой ситуации оболочка изолятора вспучивается , т.к. внутри стержня образуется газ под давлением. Обычно повреждения при перекрытиях ограничиваются металлическими оконцевателями изолятора и /или дугозащитной арматурой. Этот тип повреждений с земли выявить трудно , однако усиленная слышимая корона дает указание на то , что изолятор должен быть заменен. В некоторых случаях повреждаются концевые заделки и если стержень становится видимым или разгерметизирование очевидно , изолятор должен быть заменен. Во время периодических осмотров выявленные изоляторы , оболочка которых обесцвечена из-за солнечных лучей , или имеющие на поверхности загрязнение , плесень , незначительные повреждения юбок из-за стрельбы или сколов в срочной замене не нуждаются. Некерамические изоляторы с незначительными повреждениями оболочки или юбок могут быть отремонтированы. Слабыми в США и Канаде считаются повреждения оболочки (или юбки) диаметром до одного дюйма. Изоляторы с любыми повреждениями

стеклопластикового стержня ремонту не подлежат и в электроустановках применяться не могут. Методика ремонта некерамических изоляторов в основном состоит в следующем. Подготовку поврежденного места начинают с тщательного удаления рыхлого материала, окружающего повреждение (разрезанием и соскабливанием до гладкости), при этом очень важно не повредить стеклопластиковый стержень. Материалы, прочно не сцепленные со стержнем, должны быть удалены. После этого поверхность должна быть начисто протерта чистой ветошью, смоченной изопропиловым спиртом. Ремонт состоит в заполнении раковины RTV - силиконовой резиной и замазывании её компаундом, предназначенным для наружного использования в электротехнических устройствах. Такие замазки имеют высокое наполнение тригидратом алюминия. После ремонта обработанное место должно быть защищено от грязи и влаги до полного сшивания полимера. Обычно для полного сшивания необходимо 24 часа, после чего изолятор может устанавливаться в эксплуатацию. Металлическая арматура и оконцеватели, имеющие повреждения, ремонту не подлежат.

За рубежом известен ряд случаев, когда после установки на ВЛ со снятым напряжением, некерамические изоляторы повреждались сразу после подачи на них напряжения. Поэтому в США перед установкой новых некерамических изоляторов в эксплуатацию на ВЛ (с учетом того, что каждый из них прошел заводские испытания) рекомендуется провести испытания каждого изолятора высоким напряжением. При этих испытаниях после предварительной протирки ветошью, смоченной в изопропиловом спирте, и проверки на отсутствие внешних повреждений на каждый изолятор подается 1,5 номинального фазного напряжения ВЛ, выдерживаемого в течение 3-х минут с записью тока утечки. Во время испытаний не должно быть переключений, а малые колебания тока утечки считаются нормальным явлением. Однако, если при испытаниях ток утечки возрастает во времени, это указывает на дефект внутри изолятора, и такой изолятор возвращается производителю как дефектный. После испытаний рекомендуется сделать отметку о прохождении испытания нанесением окрашенной полосы на каждый оконцеватель. Испытанные изоляторы должны быть помещены в специальные контейнеры для безопасной транспортировки на ВЛ. Это может быть, например, ПВХ - труба с заглушками на концах, такая труба может использоваться многократно. Видимое повреждение защитной трубы может указывать на возможное повреждение изолятора в трубе.

7. Официальные сообщения по полимерным изоляторам исследовательских комитетов 33 и 12 СИГРЭ.

Предваряя дальнейшее изложение, отметим, что в настоящее время единой точки зрения по различным вопросам, связанным с характеристиками и применением некерамических изоляторов, в мире не достигнуто, многие оценки и мнения носят противоречивый, дискуссионный характер. В обзоре сначала рассматриваются мнения официальных международных организаций, а затем отдельных исследователей и фирм.

При этом последовательно излагаются различные точки зрения по одним и тем же вопросам , что неизбежно приводит к необходимости повторного рассмотрения тех или иных проблем.

Наиболее интересные и объективные данные опубликованы в докладах на сессиях СИГРЭ в 1992 - 1996 гг. / 10 - 20 /. Последний по времени официальный документ СИГРЭ - специальный доклад рабочей группы комитета 33 СИГРЭ “ Перенапряжения и координация изоляции “ , посвященный дискуссии по полимерным изоляторам на сессии 1994 г. , опубликован в / 21 /. Результаты дискуссии на сессии СИГРЭ - 96 ещё не опубликованы , однако в предварительном плане общая оценка отношения к полимерным изоляторам на этой сессии может быть дана по материалам отчета / 22 /.

На сессии - 94 в работе рабочей группы комитета 33 участвовало около 220 делегатов. Главными вопросами по полимерной (некерамической) тематике были : старение некерамической поверхности , опыт эксплуатации различных конструкций , испытания на старение , рабочие характеристики новых некерамических изоляторов и их же после старения , методы испытания изоляторов в условиях загрязнения , методы оценки характеристик локальных условий работы изоляторов.

Самым спорным из эксплуатационных показателей некерамических изоляторов является их старение. Англо-американский доклад / 14 / , подготовленный членами рабочих групп 33.04 СИГРЭ и 15.03.03. МЭК , подчеркивает , что более 60% отказов в работе были обусловлены разрушением поверхности этих изоляторов. Это обстоятельство , еще более проявившееся в дискуссии на сессии СИГРЭ - 96 , является главной причиной всё еще очень осторожного (по данным комитета 33 СИГРЭ) отношения энергоснабжающих организаций к широкомасштабному использованию некерамических изоляторов. В целом можно отметить , что только в Северной Америке (США , Канада) и в меньшей мере в Китае некерамические изоляторы применяются широко и в достаточно разнообразных по условиям работы районах. Ниже будет более подробно рассмотрен опыт эксплуатации некерамических изоляторов в отдельных странах , представленный специалистами из этих стран , (США , Германия , Италия , Франция , Китай , Швейцария и др.). Здесь же пока ограничимся оценкой международного опыта эксплуатации комитетом 33 СИГРЭ. В двух выступлениях на дискуссии - 94 сообщалось о длительных эксплуатационных наблюдениях за бушингами и длинностержневыми изоляторами с оболочками из КО-резины , в том числе при очень сильном загрязнении в Германии. После 15 лет эксплуатации в таких условиях гидрофобность поверхности попрежнему сохраняется , хотя слой загрязнения имел толщину 0,3 - 1,0 мм. В настоящее время в Германии осторожно расширяется применение некерамических изоляторов - оболочек бушингов , измерительных трансформаторов и разрядников напряжением до 420 кВ. Во Франции накоплен положительный опыт эксплуатации некерамических кабельных муфт напряжением 63-90 кВ , начинается их применение в системах 420 кВ и выше. В диапазоне распределительных напряжений во Франции большинство наружных кабельных муфт и разрядников относится к некерамическому типу.

Общепринято, что наиболее важным свойством некерамической поверхности является её гидрофобность. Потеря гидрофобности в эксплуатации в условиях загрязнения и увлажнения приводит к поверхностным перекрытиям, эрозии и последующему разрушению поверхности изолятора. Сохраняемость гидрофобности при длительной эксплуатации требует подтверждения длительными испытаниями на старение. Методы лабораторного старения, используемые в настоящее время в разных странах, весьма различны и стандартом МЭК не регламентированы. В дискуссии - 94 на комитете 33 СИГРЭ особое внимание уделялось следующим методам испытаний на старение:

-испытание на трек и эрозию по МЭК 1109 в соленом тумане 10 г/л

длительностью свыше 1000 ч;

-испытание по МЭК 1109 с циклическим воздействием соленого тумана 7 г/л, ультрафиолетового облучения, дождя и в сухом состоянии с общей длительностью свыше 5000 ч;

-вариант этого альтернативного испытания с повышенной соленостью (до 80 г/л), доклад 33 - 104 (1994 г), Италия;

-метод, принятый EPRI (США) с циклами соленого тумана

(5 г/л), ультрафиолетового облучения с отдельной имитацией

зимнего и летнего периодов, под дождем; длительность испытаний

составляет примерно 2 года, доклад 33 - 103 (1994 г), США/Канада.

Кроме указанных исполнителей наиболее углубленные и последовательные испытания на старение проводятся в EDF (Франция STRI и Chalmers University of Technology (Швеция)). В целом признается, что оба испытания, оговоренные в стандарте МЭК 1109, дают результаты, согласующиеся с опытом эксплуатации. Методы испытаний, применяемые в Италии, отражают наиболее тяжелые условия загрязнения и только лучшие современные материалы способны выдержать эти наиболее жесткие испытания. Сравнительные испытания по четырем методам ещё не проведены и в ближайшее время нельзя ожидать согласия на одну из альтернатив. Намечено продолжить дальнейшие исследования в рамках соответствующих рабочих групп СИГРЭ и МЭК. Более подробно испытания на старение рассмотрены в разделе 21, а испытания в США и Италии - в разделах 11 и 13 настоящего обзора. Следует отметить, что в России исследования старения полимерных изоляторов не проводятся, что в будущем чревато самыми непредсказуемыми последствиями.

В целом в комитете 33 СИГРЭ согласовано мнение, что характеристики загрязненных некерамических изоляторов очень существенно зависят от снижения в процессе эксплуатации гидрофобности поверхности защитной оболочки. Это означает, что испытания с искусственным загрязнением должны проводиться при гидрофобности, соответствующей той, что имеется после достаточного времени эксплуатации. Наиболее приемлемая на практике количественная оценка гидрофобности разработана в STRI (Швеция) / 23 /, однако ещё не имеется общего мнения относительно приемлемого способа воспроизведения состояния поверхности изоляторов в эксплуатации при испытании новых изоляторов. В дискуссии упоминались различные способы от механической обработки до испытаний на старение в пылевых камерах. Восстановление гидрофобности наблюдалось у лучших материалов оболочки, главным образом у кремнийорганики, как находящихся в эксплуатации (после окончания увлажнений), так и при лабораторных испытаниях после некоторой паузы после перекрытий. Многие специалисты в то же время отмечают, что даже сверх осторожные испытания новых некерамических изоляторов при искусственном загрязнении и увлажнении в условиях полной потери гидрофобности их наружной поверхности приводит к неплохим результатам благодаря удачной геометрической конфигурации некерамических изоляторов. Поэтому при любых методах испытаний их разрядные характеристики в условиях искусственного загрязнения при одинаковой длине всегда выше, чем у традиционных изоляторов. Для дополнительного использования преимуществ гидрофобности некерамических материалов необходимы дальнейшие исследования. Подробнее вопросы сохранения гидрофобности некерамических изоляторов рассмотрены в разделе 20 настоящего обзора.

В качестве меры степени загрязнения в районе эксплуатации некерамических изоляторов все участники дискуссии на СИГРЭ - 94 согласились, что в этом случае эквивалентная плотность солевых отложений (ESDD), успешно используемая для традиционных изоляторов, не подходит. Прежде всего потому, что этот параметр не учитывает гидрофобный эффект поверхности некерамических изоляторов. Многие специалисты полагают, что существует корреляция между гидрофобностью и поверхностной проводимостью. В любом случае ясно, что опыт с традиционными изоляторами не может быть использован для прогнозирования степени загрязнения в том же районе некерамических изоляторов. В этом отношении должны быть установлены новые зависимости, которые в большой степени определяются видом полимерного материала. Следует отметить большой интерес, проявляемый специалистами рабочих групп МЭК и СИГРЭ, к разработке методики испытаний некерамических изоляторов при искусственном загрязнении. В настоящее время разрабатывается первая редакция соответствующей методики, которая, как известно, отсутствует в стандарте МЭК 1109. При его разработке (80-е годы) этот вопрос считался неактуальным, но опыт эксплуатации некерамических изоляторов в загрязненных районах выявил большую актуальность этой проблемы.

Вопросы, связанные с полимерными материалами для высоковольтных изоляторов, рассматривавшиеся на СИГРЭ - 94 в комитете 15 СИГРЭ "Изоляционные материалы",

обобщены в специальном докладе / 24 /. Указывается , что разработка методов лабораторных испытаний полимерных материалов для изоляторов наружной установки остается сложной проблемой и до сих пор отсутствует единое мнение по этому вопросу. Основная проблема здесь в том , что испытания , приемлемые для оценки трека и рабочих характеристик керамических или стеклянных материалов , не могут быть просто перенесены на полимерные материалы , где механизмы трекинга и перекрытия другие. Продолжаются разногласия специалистов в отношении методики испытаний с увлажнением , длительности периода несмачивания , дополнительного воздействия ультрафиолетового облучения , необходимости влажных и сухих испытаний на трекингостойкость , типа загрязнения. Указывалось на необходимость наладки лучшего обмена информацией между недавно созданной рабочей группой IEEE , группой 15.06.02 СИГРЭ , которая изучает поведение полимерных материалов в условиях периодического воздействия тумана , и действующими в этой области рабочими группами МЭК. Для комитета 15 СИГРЭ важно лучше понимать механизм ускоренного старения , поскольку это может привести к согласию по испытаниям материалов.

В комитете 15 достигнуто общее мнение о том , что гидрофобность силикона может сохраняться в течение многих лет без каких-либо признаков ограничения срока службы , так как полимеры с низким молекулярным весом , обеспечивающие хорошую гидрофобность , могут диффундировать из объема оболочки на её поверхность. Дискуссия показала , что гидрофобность может ухудшаться погружением в воду на длительные периоды. Отмечалось , что далеко не все кремнийорганические материалы обязательно имеют необходимые гидрофобные характеристики и поэтому материал для применения в изоляторах должен тщательно подбираться. Однако и другие полимерные материалы (не силиконы) , не обладающие хорошими гидрофобными характеристиками , могут , тем не менее , иметь неплохие эксплуатационные характеристики. Отмечается , что полевые испытания для оценки состояния полимерных материалов , используемых в изоляторах , попрежнему являются областью исследований . в частности , это относится к определению в полевых условиях угла смачивания , как меры гидрофобности. Также было бы желательно иметь возможность оценивать снижение или утрату способности выдерживать напряжение , трекингостойкость и механическую прочность вследствие старения или необычных условий эксплуатации.

Из дискуссии на сессии СИГРЭ - 94 в комитетах 15 и 33 следует . что изоляторы из полимерных материалов за последнее десятилетие значительно улучшились и достаточно широко применяются также в качестве корпусов ОПН /25 - 27/. В настоящее время некерамические изоляторы становятся всё более конкурентноспособными по цене. Именно поэтому нужны дальнейшие работы по согласованию приемлемой методики испытаний полимерных материалов и изоляторов.

Материалы дискуссий в исследовательском комитете 33 СИГРЭ на сессии СИГРЭ - 96 приведены в / 22 /. В настоящее время в этом комитете работает 10 рабочих групп , одна из которых 33. 04 “ Электрическая прочность внешней изоляции , работающей при переменном и постоянном напряжении “ (руководитель д- р F. Risk , Канада)

занимается некоторыми вопросами работы полимерных изоляторов (старение , подготовка к испытаниям и методы испытаний). Этой группой в настоящее время подготавливается “ Руководство по применению изоляторов разной конструкции в разных условиях загрязнения “. На следующем коллоквиуме в 1997 г. (Канада) ИК 33 СИГРЭ в качестве одной из предпочтительных тем назвал дискуссию по сравнительным электрическим характеристикам фарфоровых , стеклянных и полимерных изоляторов при различных загрязнениях их поверхности. На сессию СИГРЭ - 98 ИК 33 выдвинул , как одну из предпочтительных , тему “Характеристики , старение,испытание и области эффективного применения на ВЛ и ПС полимерных изоляторов “.

8. Сообщения комитета 36 МЭК” Изоляторы“ по полимерным изоляторам.

Большой интерес представляет пространное интервью с профессором Германом Кёрнером , опубликованное в / 28 / , поскольку автор не только ведущий специалист в Германии по некерамическим изоляторам (Институт Высоких Напряжений Технического Университета в Брауншвейге) , но с августа 1994 г. является также председателем ТК 36 МЭК “ Изоляторы “. Поэтому в рассматриваемом интервью приводится не только немецкий опыт , но дан также более широкий взгляд на положение в мире с полимерными изоляторами.

Основное количество ВЛ в Германии попрежнему имеет фарфоровую (в основном длинностержневую) изоляцию , хотя некерамические композитные изоляторы здесь применяются уже почти 30 лет. Такое положение изготовители и энтузиасты применения некерамических изоляторов объясняют некоторым консерватизмом эксплуатирующего персонала и очень высоким качеством (надежностью) немецких фарфоровых изоляторов. Тем не менее в ряде случаев композитные изоляторы оказались незаменимыми. Так , например , перевод ВЛ 245 кВ на 420 кВ мог быть осуществлен только благодаря применению более коротких полимерных изоляторов. Также достаточно широко внедрены в Германии междуфазные композитные распорки между проводами ВЛ , что предотвращает пляску проводов. И всё же , повидимому , главная причина сдержанного отношения к полимерным изоляторам в Германии - их более высокая стоимость по сравнению с фарфоровыми длинностержневыми изоляторами. Отметим, что немецкие кремнийорганические изоляторы Roduflex (б. фирма Rosenthal) признаются специалистами одними из лучших в мире.

Основные экономические надежды в Германии связаны с возможным применением полимерных изоляторов на ВЛ 123 - 765 кВ , в особенности с новыми опорами , специально разработанными с учетом подвески полимерных изоляторов. В то же время в комитете 36 МЭК считают , что вряд ли найдутся экономически оправданные решения в пользу кремнийорганических изоляторов в средних классах напряжения , но здесь фарфору активную конкуренцию составляют циклоалифатические эпоксидные смолы. Не вызывает сомнения , что полимерные изоляторы могут оказаться незаменимыми в условиях сильного загрязнения , где благодаря их хорошей самоочистке и гидрофобности поверхности не требуется применять чистку и обмыв в эксплуатации. Однако вопрос о

сроке службы полимерных изоляторов в районах с сильными загрязнениями остается предметом острой дискуссии, поскольку соответствующий опыт эксплуатации противоречив и настораживает.

В мировой практике последних лет выявилось, что важным стимулом для организации производства полимерных изоляторов является отсутствие необходимости в больших капиталовложениях. Они несопоставимы с затратами на строительство заводов для производства керамических или стеклянных изоляторов. По лицензии от авторитетного изготовителя можно быстро начать производство в любом месте мира. Локальное, местное производство является шансом, который дается только полимерными или композитными материалами. Предполагается создание производств полимерных изоляторов в ряде стран Азии, Африки, Латинской Америки, испытывающих трудности в приобретении традиционных изоляторов.

Как уже отмечалось в настоящем обзоре, одним из важнейших параметров некерамических изоляторов является гидрофобность их наружной поверхности. Она в той или иной мере достигается у всех полимеров, но только силиконовые резины способны передавать гидрофобность на поверхность путём диффузии компонентов с низким молекулярным весом. Некоторые виды EPDM также способны осуществлять диффузию, но не в такой степени, как силиконы. К сожалению, в настоящее время нет стандартной методики измерения гидрофобности, хотя и предложены метод STRI, метод измерения угла смачивания, метод капель и др., а также отсутствует стандартный метод оценки сохранения степени гидрофобности в процессе эксплуатации. Многие потенциальные клиенты отказываются использовать изоляторы, изготовленные из полимерных материалов, из-за отсутствия стандартов, позволяющих оценить работоспособность изоляторов в эксплуатации. Отметим, что в России действуют (хотя и требуют дальнейшей проработки) методические указания по изучению характеристик изоляторов в процессе их эксплуатации. Председатель ТК 36 МЭК достаточно скептически относится к идее использования смеси EPDM (80 - 90 %) и силикона с целью использования преимуществ обоих материалов. Преимущество EPDM в его дешевизне, поэтому рассматриваемая смесь будет заметно дешевле силикона, однако не ясно, какова будет длительная гидрофобность и эксплуатационная стойкость соответствующих оболочек. У силиконовых резин некоторых типов срок сохранения гидрофобности практически бесконечен и это их главное преимущество. У смеси EPDM и силикона может оказаться недостаточно материалов с низкомолекулярным весом, диффундирующих наружу, а кроме того могут возникнуть неблагоприятные граничные явления на стыках одного компонента с другим.

Далее в / 28 /отмечается, что репутация изоляторов из циклоалифатических эпоксидных смол (ЦЭС) в последние годы несколько пострадала из-за проблем, связанных с проникновением влаги, а также в связи с применением неудачных конструкций. В самое последнее время достигнуты значительные улучшения ЦЭС в отношении стойкости к проникновению влаги, в особенности в результате улучшения состава наполнителя. Поэтому в классе средних напряжений в настоящее время не

имеется проблем с расширением применения циклоалифатических материалов. Организация локального производства в небольшом объеме здесь особенно проста. Из ЦЭС уже изготавливаются трансформаторы тока на напряжение 145 кВ (цельная отливка), однако это скорее исключение, чем норма. Скорее всего ЦЭС найдут широкое применение при напряжениях 50 - 70 кВ. Однако следует иметь в виду, что с течением времени гидрофобность ЦЭС в эксплуатации под воздействием загрязнения сильно снижается, т.к. этот материал не способен переносить гидрофобность на поверхность из-за отсутствия компонентов с малым молекулярным весом. В развивающихся странах, где трудно строить заводы по производству традиционных фарфоровых или стеклянных изоляторов, производство изоляторов из ЦЭС не потребует значительных капиталовложений. Хотя проблему создания изоляторов из ЦЭС в отличие от силиконов ещё нельзя считать доработанной, применение соответствующих изоляторов непрерывно увеличивается.

Так как большинство изготовителей композитных изоляторов тщательно охраняет секреты применяемых материалов, эти материалы не могут быть стандартизированы, а могут быть стандартизированы только их свойства. Однако из-за политики секретности со стороны изготовителей изоляторов такая стандартизация встречает сопротивление в МЭК, но потребители эту стандартизацию горячо приветствуют. Изготовители же, как правило, хотят, чтобы заказчики на слово верили, что изолятор хороший. Поэтому стандартизация должна быть направлена, как минимум, на сопоставление характеристик данных изоляторов с теми изоляторами, которые длительно и успешно работали в эксплуатации. Например, изготовителям целесообразно использовать тот тип подслоя между силиконом и стеклопластиком, который эффективно зарекомендовал себя на практике.

Говоря о конфигурации полимерных изоляторов, председатель ТК 36 МЭК указывает, что оптимальная форма их ребер определяется условиями эксплуатации. Например, в условиях пустыни целесообразно применять большие юбки с аэродинамическим профилем. В условиях морского побережья желательно иметь защищенную от прямого попадания влаги часть пути утечки.

В заключение своего интервью профессор Кёрнер указывает, что после 25 - летнего опыта путем проб и ошибок композитные изоляторы передовых фирм достигли сейчас состояния высоко технологических изделий. Если использовать соответствующие проверенные материалы и опираться на достигнутый эффективный опыт конструирования и изготовления, то можно изготовить очень хорошие изоляторы.

9. Доклады по полимерным изоляторам на сессии СИГРЭ 1996 г.

Вопросы работы полимерных изоляторов рассматривались на сессии СИГРЭ - 96 в четырех докладах: французском 33 - 304 / 18 /, японском 33 - 301 / 16 /, шведском / 20 / и немецком 33 - 303 / 17 /. В трех докладах (Франция, Япония, Швеция) представлены

результаты длительных стендовых испытаний изоляторов вблизи морского побережья - на стенде Martiges на французском побережье Средиземного моря (50 м от моря , вблизи также крупные промышленные производства) , на стенде Takejama на Японском побережье Тихого океана (150 м от моря) , на стенде Anneberg на шведском побережье Балтийского моря. На всех стендах изоляторы длительно (6 - 8 лет) находились под напряжением , периодически (через каждый час) измерялись фоновые и пиковые токи утечки. Ниже более подробно рассмотрены результаты исследований на каждом из стендов.

Французский доклад / 18 / обобщает результаты исследований , произведенных совместно французской объединенной энергосистемой (Electricite de France) и фирмой Sediver , в настоящее время являющейся крупнейшим производителем не только стеклянных , но и полимерных изоляторов. Исследовались изоляторы с тремя материалами оболочки : EPDM и две модификации кремнийорганической резины (силикона). Параллельно с испытанием на стенде изоляторы испытывались в 2 - х испытательных камерах на ускоренное старение (EdF , Sediver). Через каждые 1000 часов испытаний в камерах и через каждые 6 - 10 месяцев естественного загрязнения изоляторы демонтировались и определялись их электрические характеристики и физико-химические параметры оболочек. Исследования показали (на основе сопоставления изоляторов , состаренных на стенде и в камерах) , что коэффициент ускорения старения в лабораторных условиях при принятой методике (24 - х часовые циклы при непрерывно приложенном напряжении и чередовании в каждом цикле дождя , нагрева до 50 С , влажности воздуха более 95 % , соленого тумана 7 кг/м³ , солнечной радиации интенсивностью 1000 Вт/м²) оказался равным 15.

Было выявлено значительно более высокое увеличение твердости и шероховатости поверхности у силиконов по сравнению с EPDM (район установки изоляторов характеризуется очень большой солнечной активностью - 300 дней в году). Для всех оболочек отмечено необратимое увеличение отношения содержания кислорода к содержанию углерода , большее у EPDM , чем у силиконов. Такое поверхностное окисление материалов в конечном счете способствует снижению гидрофобности поверхности защитной оболочки. Класс гидрофобности поверхности изоляторов оценивался по известной методике STRI / 23 / при искусственном увлажнении демонтированных со стенда и из камер изоляторов. Во время испытаний все изоляторы значительно ухудшили свою гидрофобность в результате действия частичных дужек , влажности , солнечной радиации и т.д. Для EPDM после испытаний наблюдалось очень медленное и неполное восстановление гидрофобности даже после нескольких недель по окончании испытаний. Напротив силиконы восстанавливали основную часть своей первоначальной гидрофобности уже через неделю , даже в тех случаях , когда она была существенно утрачена при испытаниях. После длительного прекращения воздействий , способствующих старению , все силиконовые изоляторы полностью восстановили свою первоначальную гидрофобность. Были получены несколько различные результаты ускоренного старения в камерах EdF и Sediver. Авторы доклада объясняют это недостаточно жесткой унификацией методики соленого тумана в стандарте МЭК 1109 при

испытаниях на старение и рекомендуют привести эту методику в соответствии с рекомендациями стандарта МЭК 507.

В целом испытания на стенде Martiges не обнаружили существенного старения ни изоляторов с оболочкой из EPDM, ни изоляторов с кремнийорганическими оболочками (кроме слабой эрозии), что авторы доклада объясняют хорошей стойкостью к старению полимерных изоляторов нового поколения. Некоторые признаки старения на стенде и в камерах выявили только тонкие физико-химические методы исследований - сканирование электронным микроскопом, измерение шероховатости и твердости защитных оболочек, фотоэлектронная и инфракрасная спектроскопия, определение класса гидрофобности.

Были зарегистрированы токи утечки существенно большие на EPDM, чем на силиконе (и на стенде, и в камерах). При этом на всех полимерных изоляторах токи утечки были намного ниже, чем на эталонной гирлянде стеклянных изоляторов. Испытания в камере показали, что при соленостях 7 и 80 кг/м³ удельные разрядные напряжения новых и состаренных полимерных изоляторов примерно равны и намного (до 1,5 раз) выше, чем у керамических изоляторов. Примерно одинаковые удельные разрядные характеристики в соленом тумане имеют новые и состаренные на стенде и в камерах изоляторы с оболочками из EPDM и кремнийорганической резины. Тем не менее после длительного нахождения в условиях интенсивного естественного загрязнения (район расположения стенда Martiges соответствует III степени загрязнения по стандарту МЭК 815) полимерные (EPDM, силиконы) изоляторы существенно (более чем в 2 раза) снизили свои влагоразрядные характеристики (в чистом тумане) по сравнению со своим первоначальным состоянием (у силиконовых изоляторов разрядные напряжения на 10 - 20 % выше, чем у EPDM). При этом эквивалентная плотность солевого отложения ESDD после длительного пребывания в естественных условиях у изоляторов из EPDM и силикона была примерно одинаковой. Удельная поверхностная проводимость слоя загрязнения у естественно загрязненных изоляторов из EPDM составила 2-3 мкСм, а у кремнийорганических изоляторов 0,6-1,3 мкСм.

В японском докладе / 16 / сообщается об исследованиях на стенде изоляторов с оболочками из кремнийорганической резины и EVA. Ежемесячно производился демонтаж изоляторов со стендов и определение на них ESDD. Средняя величина ESDD по результатам примерно 102 измерений (1987 - 1995 гг.) оказалась практически одинаковой на фарфоровых, кремнийорганических и этилен-винилацетатных изоляторах и составила около 0,01 мг/см². Регулярное измерение тока утечки выявило, что у силиконовых изоляторов они оказались более низкими и наблюдались реже, чем на фарфоровых изоляторах, тогда как изоляторы с оболочками из EVA были по этому показателю практически сопоставимы с фарфоровыми изоляторами. Существенного старения (трекинга или эрозии) и перекрытий полимерных изоляторов на стенде (удельная длина пути утечки около 2 см/кВ) не наблюдалось, хотя на поверхности силиконовых изоляторов (в большей степени, чем у изоляторов с оболочкой из EVA) появились большие белые участки ("мелование"). Вся остальная поверхность

изоляторов , в том числе кремнийорганических , оказалась покрытой достаточно толстым сплошным , практически равномерным слоем загрязнения.

Во второй части рассматриваемого японского доклада сообщается о разработке нового метода искусственного загрязнения полимерных изоляторов , позволяющего хорошо воспроизвести загрязняемость полимерных изоляторов в естественных условиях. Обычные методы искусственного загрязнения , применяемые для традиционных изоляторов по стандарту МЭК 507 (погружение и обливание) , на новых полимерных изоляторах не позволяют получить равномерный сплошной слой загрязнения , наблюдаемый в естественных условиях. Были отвергнуты пескоструйные методы обработки поверхности изоляторов и методы добавления смачивающих агентов. Новый метод искусственного загрязнения полимерных изоляторов включает в себя следующие этапы : набрызгивание мельчайших капель воды на гидрофобную поверхность изолятора , по возможности равномерное напыление порошка “ Топоко “ на поверхность изолятора через сито , естественная сушка изолятора , смыв отложившегося порошка струёй воды , погружение изолятора в суспензию загрязняющего вещества , вынимание изолятора из суспензии и сушка. На изоляторах , искусственно загрязненных по предложенной методике , было исследовано влияние на разрядные напряжения полимерных изоляторов таких факторов , как плотность тумана , время после загрязнения до испытания , плотность солевого отложения , плотность нерастворимого загрязнения. Авторы японского доклада на СИГРЭ - 96 полагают , что результаты проведенных ими исследований смогут внести вклад в стандартизацию метода испытаний полимерных изоляторов при искусственном загрязнении.

Изучению длительного старения изоляторов с оболочками из КО - резины и EPDM в условиях естественного (морского) загрязнения посвящен шведский доклад / 20 / на сессии СИГРЭ - 96. На стенде Anneberg исследования проводились с начала 80 - х годов и результаты исследований полимерных изоляторов первого поколения , имевших на стенде много повреждений , изложены в докладе на сессии СИГРЭ - 90 / 29 /. Начиная с 1987 г. по 1995 г. включительно , на стенде под напряжением 132 кВ исследовались изоляторы нового поколения с примерно одинаковой длиной пути утечки ($370 + 10\%$) см и удельной длиной пути утечки 1,5 - 1,7 см/кВ. Непрерывно измерялись токи утечки по поверхности изоляторов и регистрировались погодные условия , оценивалось состояние их поверхности , включая гидрофобность , которая определялась по методике STRI. Для физико-химического анализа состояния поверхности изоляторов использовалась электронная , инфракрасная и сканирующая спектроскопия. Район испытания изоляторов находится в 10 км от морского побережья в сельскохозяйственном регионе Швеции. Растворимая часть загрязнения на изоляторах - поваренная соль , приносимая с моря , в особенности при сильных ветрах со стороны моря (8 - 10 м/с). Изоляторы поставлялись на стенд бесплатно изготовителями из разных стран мира и подвешивались на опытной ВЛ длиной 180 м на высоте 17 м от уровня земли. Каждый тип испытываемого изолятора подвергался не только электрическим воздействиям , но и устанавливался также и без напряжения на открытой площадке.

Все изоляторы с оболочкой из кремнийорганической резины вели себя на стенде удовлетворительно, 2 изолятора с оболочкой из EPDM были перекрыты при морских солевых штормах и демонтированы. Гидрофобность кремнийорганических изоляторов была очень высокой (на всех испытывавшихся изоляторах 2 - й класс гидрофобности по / 23 /). Все изоляторы с оболочками из EPDM в значительной степени потеряли свою гидрофобность после длительного пребывания на стенде, а некоторые из них стали полностью гидрофильными. Однако лучший из изоляторов из EPDM восстановил свою гидрофобность почти полностью и имел очень малые токи утечки. Изоляторы из КО - резины оказались менее гидрофобны на нижней части ребер и на стержне (эти части затенены), а из EPDM более гидрофобны на нижней стороне ребер и полностью гидрофильны на их верхней поверхности. Таким образом выявлено, что на степень гидрофобности влияет не только материал изоляторов, но и их конфигурация.

Исследования статистики токов утечки на полимерных изоляторах позволили разбить диапазон токов утечки на пять классов и связать эти классы с состоянием поверхности изоляторов: 1 - менее 0,5 мА, непрерывный фоновый (без пиков) ток утечки, дужки на поверхности изоляторов отсутствуют, наличие на поверхности небольших подсушенных зон; 2 - 0,5-1,0 мА, попрежнему фоновый ток с небольшими пиками, малое искрение на поверхности изоляторов, практически неразличимое невооруженным глазом; 3 - 1 - 5 мА, заметные импульсы тока утечки, соответствующие небольшим дужкам (искрению) на поверхности изоляторов, видимым невооруженным глазом; 4 - 5 -25 мА, импульсы тока утечки, на поверхности изоляторов видны развитые частичные дужки; 5 - более 25 мА, импульсы тока утечки, при которых дужками может перекрываться несколько ребер изолятора. Интересно отметить, что хотя на кремнийорганических изоляторах импульсы тока утечки наблюдались реже и были меньше по амплитуде чем у EPDM, при солевых штормах даже на КО - резине зарегистрированы импульсы тока утечки более 85 мА. Это показывает, что проблема работы при загрязнении существует и у полимерных изоляторов, длительно сохраняющих высокую гидрофобность своей поверхности.

Исследования с привлечением физико-химических методов анализа показали, что на срок службы кремнийорганических изоляторов в условиях сильных загрязнений кроме прочих хорошо известных факторов большое влияние имеет количество и тип наполнителя в материале защитной оболочки. Сканирование электронным микроскопом выявило невидимым глазом микро- трещины и другие повреждения на EPDM и практически отсутствие их на КО - резине. Подробные данные о конструкциях изоляторов, исследованных на стендах в / 16, 18, 20 / не приводятся, но можно сделать вывод, что у подвесных полимерных изоляторов, предназначенных для работы в сильно загрязненных районах, применяются чаще всего ребра с переменным вылетом и расстоянием между ними 3 - 4 см.

Немецкий доклад / 17 / подготовлен германскими изготовителями изоляторов и руководителем ТК 36 МЭК "Изоляторы". В этом докладе подробно рассмотрены некоторые структурные особенности оболочек изоляторов из КО - резины (силиконов),

успешно работающих на ВЛ в Германии с 1967 г. , в том числе в условиях интенсивного загрязнения. Подчеркивается , что КО - резины охватывают большое число различных по характеристикам полимерных материалов на основе силоксанов , отличающихся химическим составом (формулами) , процессами вулканизации , материалом наполнителей и других добавок. Особо отмечается , как и во многих других сообщениях, что только силиконы способны восстанавливать свою поверхностную гидрофобность после её временной утраты , например , после перекрытия дугой. Кроме того , силикон способен передавать водоотталкивающие свойства слою загрязнения на поверхности изоляторов. Это приводит к очень низким токам утечки в условиях увлажненного загрязнения.

Авторы доклада указывают , что неправильно классифицировать силиконы , как это часто делается , только по температуре их вулканизации , т.к. сам механизм вулканизации тоже может быть различным. По температуре вулканизации силиконы в Германии делятся на три класса , обычно указываемые в публикациях по кремнийорганическим изоляторам :

RTV - вулканизация при комнатной температуре ;

LTV - вулканизация при низкой температуре ;

HTV- вулканизация при высокой температуре. Механизм вулканизации изготовители применяют различный : конденсационный - RTV (литьё под давлением) , аддитивный - RTV (литьё под низким давлением) , LTV (литьё под давлением) , HTV (литьё под высоким давлением , экструзия) , полимеризационный - HTV (литьё под высоким давлением , экструзия). Высокая вязкость эластомера достигается только при вулканизации методом HTV. Отметим , что в различных дискуссиях на международных конференциях в последнее время неоднократно высказывалось мнение , что только КО- изоляторы, изготовленные методом HTV , не имеют заметных признаков старения в эксплуатации.

Для повышения прочности на разрыв и отрыв в силиконовые резины обычно вводится кремнийорганическая кислота. При этом высокая эластичность и упругость силиконов почти не зависит от температуры вулканизации. В рассматриваемом докладе обобщены основные физико-химические характеристики типичных силиконов. Сильная связь Si - O гарантирует высокую термостойкость , высокое сопротивление силиконов воздействию окружающей среды , озона , УФ излучения и короны. Преимуществом связи Si - O , сходной со структурой кварца или стекла , является то , что при обгорании материала оболочки (например , при искрении подсушенной зоны) образуется непроводящий слой. Чаще всего силиконы наполняются тригидратом алюминия , в результате чего (при оптимальном соотношении кремнийорганика / наполнитель) улучшается сопротивление материала оболочек трекингу и эрозии. Особенность гидрофобных свойств силиконов связана с характерной только для них диффузией из массы полимерной оболочки на её поверхность низко -молекулярных групп , состоящих

из нескольких молекул полиметил - силоксана. В современных полимерных изоляторах , в частности , изготавливаемых в Германии после 1979 г. , количество низкомолекулярных компонентов достаточно для восстановления поверхностной гидрофобности в течение всего требуемого срока службы изоляторов. Многие исследователи признают , что рассматриваемый механизм передачи гидрофобности , проверенный во многих работах на подвесных изоляторах , имеет практически ничем не ограничиваемый срок действия . Например , было проведено сравнительное исследование новых изоляторов и таких же образцов после шестилетней эксплуатации. У новых и демонтированных изоляторов содержание низкомолекулярных КО - компонентов оказалось почти одинаковым , при этом достаточно большое количество низкомолекулярных КО - компонентов оказалось в слое загрязнения демонтированных из эксплуатации изоляторов. Благоприятное воздействие низкомолекулярных компонентов столь велико , что даже после полной экстракции их из слоя естественного загрязнения он сохраняет явную гидрофобность при последующем увлажнении. Результаты подробного исследования химической структуры низкомолекулярных компонентов приведены в / 17 /.

Накоплен большой и успешный опыт работы кремнийорганических изоляторов немецкого производства в Германии, Австрии, Канаде, Китае, Египте, Малайзии, Новой Зеландии, Южной Африке, ОАЭ, США, Вьетнаме и почти во всех европейских странах, в том числе на ВЛ постоянного тока + 400 кВ и + 500 кВ (срок эксплуатации более 10 лет). В условиях интенсивного солевого загрязнения силиконовые изоляторы , как показал широкий опыт эксплуатации , не требуют обмыва. В Абу - Даби полимерные изоляторы немецкого производства были применены на ВЛ 400 кВ вблизи морского побережья при удельной длине пути утечки 4 см/кВ вместо 5 см/кВ у традиционных изоляторов. Это позволило применить более компактную и легкую изоляционную подвеску без чистки или обмыва. Известны и другие примеры эффективного применения кремнийорганических изоляторов немецких фирм Rosenthal, Hoechst и др. Так ещё в 1977 г. одна ВЛ в Германии была переведена с 275 кВ на 420 кВ без изменения размеров опор с применением асимметричной V - образной комбинированной подвески , состоящей из длинно стержневого полимерного изолятора (подвесной элемент) и фарфорового стержневого изолятора (работающий на сжатие элемент подвески). В 1994 - 1995 гг. аналогичная конструкция была использована для модернизации двухцепной ВЛ 380 кВ с переводом на четверенные провода при сохранении размеров опор и полосы отчуждения. Модернизация этой ВЛ (теперь это двухцепная ВЛ 420 кВ) стала возможной благодаря применению асимметричной V - образной подвески , состоящей из очень короткой вертикальной сдвоенной гирлянды из кремнийорганических изоляторов и диагональной гирлянды с обычными изоляторами. Хотя эта подвеска оказалась на 40 % дороже , чем V - образная гирлянда из традиционных изоляторов , значительно большая экономия была обеспечена благодаря сохранению размеров опор. Кроме того при этом удалось избежать длительной и сложной приёмки новой ВЛ. На другой ВЛ в Германии в 1993 г. обычные фарфоровые длинностержневые изоляторы (4 последовательно включенных изолятора) были заменены полимерными (один длинностержневой изолятор) , т.к. в соответствии с ужесточившимися немецкими стандартами на ранее

эксплуатировавшихся на этой ВЛ фарфоровых изоляторах нельзя было обеспечить требуемые в настоящее время минимальные расстояния (длину гирлянды). Применение на ВЛ полимерных изоляторов позволяет увеличить расстояния не только между проводом и землей , но и между фазами , что приводит к уменьшению напряженности поля и позволяет применить полимерные изолирующие распорки для компактизации ВЛ. Такие распорки из кремнийорганических изоляторов применяются уже более 20 лет. Чаще всего такие полимерные распорки используют не для компактизации ВЛ , а для предотвращения пляски проводов. При этом резко уменьшается количество междуфазных перекрытий.

Опытные образцы полых немецких полимерных изоляторов (покрышки трансформаторов тока и разрядники , проходные изоляторы) проходят в настоящее время испытания на ОРУ до 500 кВ. Эти изоляторы в целом имеют такие же характеристики как у соответствующих фарфоровых изоляторов , но кроме того они взрывобезопасны , стойки к загрязнению и имеют малый вес , выдерживают высокие нагрузки на изгиб и кручение , а также сейсмостойки. В последние годы растет интерес к применению на ВЛ в Германии опорных полимерных изоляторов. В Северной Америке большое количество таких изоляторов уже установлено в сетях относительно низких напряжений. Из - за малого веса эти изоляторы могут устанавливаться непосредственно на опорах без траверс. Благодаря применению опорных полимерных изоляторов можно конструировать эффективные компактные ВЛ. Однако опыт эксплуатации полимерных опорных изоляторов на ВЛ при длительных изгибающих нагрузках ещё недостаточен.

10. Некоторые рекомендации рабочих групп СИГРЭ.

По наиболее важным вопросам работы полимерных изоляторов создаются рабочие группы СИГРЭ , которые подготавливают соответствующие рекомендации. Так обстояло дело , например , при разработке стандарта МЭК 1109 (1992 г.) , который базировался на рекомендациях рабочей группы 10 Комитета 22 СИГРЭ / 30 / или при рассмотренном выше обобщении опыта эксплуатации полимерных изоляторов / 3 , 4 /. Ниже рассмотрены подготовленные в последние годы рекомендации рабочих групп СИГРЭ по идентификации хрупкого излома стеклопластиковых стержней / 31 / и по использованию дугозащитных экранов на композитных изоляторах / 32 /.

Как известно , некоторые типы композитных подвесных изоляторов различных изготовителей (первого поколения) оказались механически непрочными даже после очень короткого срока эксплуатации , что привело в 1970 - 1980 гг. к ряду серьезных аварий. Эти отказы произошли при механических нагрузках на изоляторы , значительно меньших , чем номинальная , а поверхность разрушения стеклопластика заметно отличалась от наблюдающейся при лабораторных механических испытаниях. Этот вид разрушения , впоследствии получивший название “ хрупкого излома “ , был

воспроизведен в лабораторных условиях , когда к стеклопластиковому стержню прилагались относительно низкая растягивающая нагрузка и одновременно кислотное воздействие. В / 31 / даны рекомендации по идентификации хрупкого разрушения стеклопластикового стержня композитных изоляторов. Основные визуально наблюдаемые характеристики хрупкого излома стеклопластика : гладкая (без осколков) поверхность разрушения , в основном расположенная перпендикулярно оси стержня (лишь некоторые волокна выступают из смолы) , наличие нескольких одновременно формирующихся по длине стержня плоскостей (трещин) разлома , поверхности разрушения чистые , не видно большого числа разрушенных волокон. В отличие от хрупкого излома при обычном разрушении стеклопластика растягивающей нагрузкой видно много разрушенных волокон (не кристаллических , а белых) , мелких частиц стекла и смолы , а поверхность разрушения находится под углом 45° к оси стержня. Хрупкий излом следует тщательно отличать от нормальных форм разрушения , которые могут выглядеть очень похоже , но имеют совершенно иное происхождение.

В / 31 / описан следующий механизм хрупкого излома . Чаще всего он происходит внутри металлической арматуры изоляторов , где распределение механических напряжений по сечению стержня особенно неравномерно. Трещина , начинающая хрупкое разрушение под действием растягивающей нагрузки , медленно распространяется до тех пор , пока вследствие постепенного уменьшения поперечного сечения стержня механическое напряжение возрастает до достаточно высокого уровня , производящего разрыв волокон. Изучение поверхности хрупкого разрушения с помощью микроскопа обнаруживает “ линии остановки “ , где начинаются трещины. Оценка многих хрупких разрушений показывает , что они связаны с низкой механической нагрузкой , медленным распространением трещин , инициацией их на поверхности стеклопластикового стержня. Обязательным фактом , сопровождающим хрупкие разрушения , является наличие контакта со стеклопластиком активных химических веществ , особенно кислотного раствора , т.е. хрупкое разрушение связано с коррозией материала стеклопластика в сочетании с механической нагрузкой. Когда кислота контактирует со стекловолокнами , происходит ионный обмен между кислотой и стеклянной решеткой. Это приводит к повышенным нагрузкам на поверхности стекловолокна , вызывающим спиральные трещины на поверхности стекла. Как известно , стеклопластиковые стержни композитных изоляторов изготавливаются из стекловолокон , размещенных в полимерной смоле. Высокая механическая прочность стержней определяется стекловолокнами. Трещины начинаются в смоле и обычно прекращают свое распространение вблизи стекловолокна. Если кислота достигает стекловолокна (обычно это происходит вблизи или на поверхности стержня) , волокно разрывается в плоскости распространения трещины. Разрывы происходят постепенно волокно за волокном. Кислота может мигрировать также продольно , вызывая постепенное распространение хрупкого разрушения вдоль стержня. При этом по мере распространения трещины механическое напряжение перед трещиной возрастает и поэтому трещина распространяется всё более быстро. На заключительной стадии , когда скорость распространения трещины достигает скорости звука в стеклопластике , режим разрушения изменяется с хрупкого на нормальный.

Рассмотренное явление хрупкого излома может наблюдаться на композитных изоляторах, подвергающихся обычным атмосферным воздействиям, поскольку некоторые кислоты в различной концентрации могут содержаться в атмосферном воздухе. Азотная кислота может образовываться также на поверхности изолятора при электрических разрядах во влажном воздухе. Опасность хрупкого излома резко возрастает, если ребра защитной оболочки изоляторов повреждаются и обнажают стержень. Особенно чувствительной зоной для излома является место перехода от оболочки изолятора к её концевой арматуре. Здесь применяются материалы с различными коэффициентами теплового расширения и они должны быть соединены между собой так, чтобы избежать проникновения влаги во внутреннюю полость арматуры. Необходимо применять предупредительные меры, чтобы кислотный раствор не мог воздействовать на стеклопластиковый стержень. Рекомендуется использовать типы стеклопластика, обладающие повышенной сопротивляемостью коррозии. Целесообразно проводить испытания с одновременным воздействием растягивающей нагрузки и кислот, что позволяет оценить стойкость стеклопластиковых стержней к химической коррозии. Поскольку при стандартных механических разрушающих испытаниях композитных изоляторов в лабораторных условиях, как правило, наблюдается совсем не тот вид разрушения, который характерен для эксплуатации, в / 31 / рекомендуется разработать стандартную методику испытаний, воспроизводящую эксплуатационные разрушения. Для устранения явления хрупкого излома необходим жесткий контроль материала стержня и выбор конструкции изолятора, предотвращающей проникновение влаги к стеклопластиковому стержню.

В докладе рабочей подгруппы 03. 01. исследовательского комитета 22 СИГРЭ / 32 / обобщена мировая практика применения дугозащитной экранной арматуры на подвесных одноэлементных композитных изоляторах. Защитные экраны применяют по следующим (одной или нескольким) причинам: улучшение распределения напряжения по изолятору, в особенности на границах раздела различных материалов (стеклопластик - оболочка, арматура - оболочка, стеклопластик - подслой и т.д.); снижение напряженности электрического поля в воздухе вблизи оконцевателей изолятора; защита оконцевателей изолятора от действия силовой дуги; предотвращение разрядов на подсушенных зонах вблизи оконцевателей изоляторов в условиях загрязнения.

Известно, что хорошие полимерные материалы мгновенно разрушаются при очень высокой напряженности электрического поля. Однако они могут разрушаться и при значительно более низких электрических напряженностях при длительном воздействии напряжения. Обычно это явление объясняется влиянием частичных разрядов внутри воздушных микровключений, возникающих на поверхностях раздела между различными материалами. У композитных изоляторов конструкция концевой арматуры должна быть такой, чтобы напряжение возникновения внутренних частичных разрядов было выше рабочего напряжения ВЛ. Напряженность электрического поля в стержне и оболочке композитного изолятора зависит от конструкции и размеров металлических деталей и от диаметра стержня. Защитные экраны особо важны при малом (менее 20 мм) диаметре стержней изоляторов. Критические уровни напряженности могут быть достигнуты не

только у конца изолятора , находящегося под напряжением , но и на заземленном конце изолятора. Это связано с тем , что при увлажнении слоя загрязнения могут возникать разряды под первым ребром у нижнего конца изоляторов , в этом случае экранная арматура на заземленном конце изолятора может помочь устранить проблему.

Как правило , экраны рекомендуется применять на изоляторах класса напряжения 220 кВ и выше. В необходимых случаях , как рекомендовано в / 32 / , в лабораторных условиях должны быть проведены испытания с моделированием опоры , провода и линейной арматуры.

Стойкость оконцевателей и защитной арматуры к воздействию силовых дуг зависит от параметров тока к.з. (амплитуда , длительность и частота повторения дуговых воздействий) , типа и объема металла , используемого для изготовления арматуры , и толщины концевой арматуры . При нагревании оконцевателей током к.з. может произойти выкальзывание стержня или необратимое повреждение оконцевателя. Для изоляторов сравнительно небольших классов напряжения могут использоваться простейшие экраны или рога. По возможности эти устройства должны быть присоединены не к оконцевателям изолятора , а к промежуточным элементам линейной арматуры. Искрение подсушенной зоны у конца изолятора , находящегося под напряжением , способное вызвать эрозию защитной оболочки и выход изолятора из строя даже в районах с незначительными загрязнениями , может быть уменьшено или полностью устранено соответствующим снижением напряженности электрического поля путем применения экранной арматуры.

Положение экранов относительно оконцевателей и ребер изоляторов обычно определяется расчетами электрического поля. В некоторых случаях могут оказаться необходимыми экраны на обоих концах изолятора. Экраны должны обеспечивать отвод дуги от поверхности изолятора таким образом , чтобы опорные точки дуги были расположены не на оконцевателях изолятора , а на защитной арматуре. Для защиты загрязненных изоляторов наиболее целесообразно применение экранов , плотно прилегающих к поверхности изоляторов. Общие рекомендации по применению экранов дать затруднительно , т.к. они зависят от конструкции изоляторов (особенно от конструкции оконцевателей).

В настоящее время в рабочих группах СИГРЭ ведется разработка документа , регламентирующего методику испытаний некерамических изоляторов при искусственном загрязнении. Отметим также , что в стадии разработки находятся документы МЭК и IEEE по полым композитным изоляторам (покрышкам) и по опорным полимерным изоляторам для ВЛ / 33 , 34 /.

11. Опыт эксплуатации и некоторые результаты исследований полимерных изоляторов в США.

Вопросы применения и исследований некерамических изоляторов в США освещены в многочисленных публикациях, наиболее полные и современные данные приведены в / 14, 37, 38, 39, 40 /. Североамериканский опыт применения полимерных изоляторов является в мире наиболее длительным и обширным, соответствующие данные занимают большую часть рассмотренного в разделе 5 международного обобщения опыта эксплуатации. На этот опыт в основном ссылаются организаторы симпозиумов (Цюрих - 1995 г., Сингапур - 1996 г.), призывающие к более широкому применению полимерных изоляторов в различных странах.

Применение композитных изоляторов в США регламентировано национальным американским стандартом / 35 /, а нормы и методы их испытаний национальным стандартом / 36 /. В настоящее время в США полимерные изоляторы составляют около 20 % от всех вновь устанавливаемых линейных изоляторов. Они особенно хорошо проявили себя в районах с сильными ураганами и в районах с сильными загрязнениями. Однако в эксплуатации в США наблюдается и заметное ухудшение свойств поверхности некерамических изоляторов, подвергшееся подробному обсуждению в американском докладе на сессии СИГРЭ - 94 / 14 /. По данным EPRI причиной 64 % всех отказов некерамических изоляторов в эксплуатации является ухудшение их характеристик в результате старения поверхности (в 17 % случаев отказы происходят из-за снижения механической прочности изоляторов, в 18 %-электрической, 1 % - вследствие растрелов). Основные причины старения некерамических изоляторов в эксплуатации по американским данным - солнечная радиация, перепады температуры, влияние загрязнений и влажности. В настоящее время в нескольких исследовательских центрах США ведутся исследования по воспроизведению механизма старения полимерных изоляторов в лабораторных условиях. По данным эксплуатационных наблюдений энергокомпаний США ухудшения начинаются с обесцвечивания и появления шероховатости поверхности, далее происходит ускорение накопления загрязнения, развивается корона и поверхностные разряды. Вследствие этого может произойти эрозия, повреждения и пробой защитной оболочки изоляторов. Опыт эксплуатации в США дает основание рассчитывать на расширение успешной эксплуатации полимерных изоляторов в загрязненных районах без применения профилактических эксплуатационных мероприятий, хотя определенные сомнения остаются. В / 14 / рекомендовано осматривать полимерные изоляторы с периодичностью один раз в год (это достаточно ввиду медленности процесса старения) и повредившиеся изоляторы заменять. Отмечено, что значительно улучшаются характеристики полимерных изоляторов при использовании экранной арматуры. Наблюдения на ВЛ ночью показали, что при увлажнении на поверхности некерамических изоляторов всегда имеют место частичные

разряды , которые наряду с солнечной радиацией являются основной причиной постепенного ухудшения характеристик полимерных изоляторов.

На симпозиуме в Цюрихе главный инженер крупной американской энергокомпании “ Salt River Project “ (“ SRP ”) , снабжающей электроэнергией около 600 тысяч потребителей в Центральной Аризоне , привел данные об опыте применения некерамических изоляторов / 38 /. На ВЛ компания давно и успешно использует почти исключительно фарфоровые изоляторы. Однако в последние годы конкуренцию им , в том числе по стоимости, составили полимерные изоляторы , имеющие хорошую репутацию у монтажников и эксплуатационников. Они настаивают на увеличении применения некерамических изоляторов вследствие их малого веса , уменьшения проблем , связанных с загрязнением , антивандальных свойств этих изоляторов и т.д. С 1972 г. в SRP успешно эксплуатируются полимерные кабельные муфты на напряжение 12 кВ , а с 1978 г. полимерные изоляторы с оболочками из EPDM и кремнийорганической резины начали применять здесь на ВЛ , в том числе 230 и 500 кВ. Очень хорошо проявили себя полимерные изоляторы в условиях загрязнения на ВЛ 115 кВ вблизи спиртозаводов и ГЭС , где при сбросе воды воздух имеет очень большую влажность. В системе 69 кВ ранее использовались в основном штыревые фарфоровые изоляторы , которые часто разрушались , в особенности при ударных нагрузках на металлических опорах. Надежность эксплуатации в этих условиях удалось существенно увеличить применением на всех опорах ВЛ 69 кВ (в том числе и на деревянных опорах) штыревых полимерных изоляторов. В SRP внедрены опорные полимерные изоляторы также на металлических опорах пяти ВЛ 500 кВ. Это было весьма рискованным решением , но уже в течение 18 лет эксплуатации аварий не было. Накоплен положительный опыт эксплуатации подвесных полимерных изоляторов на ВЛ 230 кВ в течение 15 лет. В то же время несколько полимерных изоляторов (в основном с оболочкой из EPDM) было демонтировано с ВЛ 230- 500 кВ , так как на них было обнаружено мелование (выделение извести) , хотя в целом изоляторы внешне выглядели хорошо и энергокомпания считает возможной дальнейшую их эксплуатацию. В последние годы энергокомпания почти исключительно применяет изоляторы , изготовленные методом инъекции. Опыт эксплуатации привел компанию к решению применять изоляторы с оболочками только из EPDM и , в первую очередь , из кремнийорганической резины.

Опыт эксплуатации в SRP и других энергокомпаниях США показал , что УФ излучение в сочетании с высокой температурой и в присутствии влаги может оказаться решающим фактором для срока службы полимерных изоляторов , эксплуатирующихся в районах с “ пустынным “ климатом , характерным для SRP. В этих условиях кремнийорганическая резина проявила себя лучше , чем EPDM. В соответствии со стандартом / 36 / стержни изоляторов SRP использует только на эпоксидной или винилэфирной основе , оболочка должна быть изготовлена из кремнийорганической резины (100 % силикона до введения наполнителя) и прочно связана со стержнем. Оконцеватели , применяемые SRP , должны изготавливаться в соответствии с нормой ASTM A 153 и закрепляться на изоляторе методом обжатия с обеспечением равномерной передачи нагрузки на поверхность стержня. При этом не допускается какое-

либо разрушение стержня внутри оконцевателя , кроме того должно быть обеспечено стабильное уплотнение , предотвращающее попадание влаги внутрь оконцевателя. На изоляторах для ВЛ 230 - 500 кВ устанавливается экранная арматура. В SRP имеются свои технические условия на применение полимерных изоляторов в энергоустановках 69 - 500 кВ , базирующиеся на национальном стандарте / 36 / и стандарте МЭК / 1 /. В технические условия введены также дополнительные требования по испытаниям полимерных изоляторов при искусственном загрязнении (поваренной солью) , на трекингоэрозионную стойкость по местной методике , на обмыв полимерных оболочек при высоком давлении , на прочность крепления экранной арматуры полимерных изоляторов ВЛ 500 кВ при приложении вибрационной механической нагрузки. В 1992 - 1993 годах в SRP начали применять полимерные изоляторы не для специальных целей на отдельных опорах и участках , а на ВЛ в целом. Например , на полимерных изоляторах построена ВЛ 500 кВ , 1300 мВт , 412 км (Mead Phoenix Project). В проекте рассмотрена возможность трансформирования этой ВЛ в электропередачу постоянного тока + 500 кВ с использованием полимерных изоляторов.

В последние годы в США расширяется применение на ВЛ горизонтальных полимерных изоляторов. Наиболее подробно этот вопрос рассмотрен в / 39 / на примере опыта другой крупной энергокомпании " Florida Power and Light " (" FPL "). Повышение стоимости получения новых полос отчуждения в плотно заселенных сельскохозяйственных районах Флориды ускорило разработку проектов компактных ВЛ. Ещё в 1960-х годах здесь были спроектированы и введены в эксплуатацию компактные ВЛ 69 , 138 и 230 кВ с горизонтальными опорными фарфоровыми изоляторами. Однако из-за механических разрушений этих изоляторов при сильных ветрах и других неблагоприятных условиях в FPL произошло множество очень тяжелых каскадных аварий с падением проводов ВЛ 138 и 230 кВ на землю. При 10 авариях вышло из строя 550 керамических изоляторов с падением провода на землю на трассе длиной 10 миль. По этой причине FPL в 1977 г. построила две опытных ВЛ 138 кВ с 567 опорными полимерными ребристыми изоляторами , рассчитывая на их меньшую подверженность каскадным механическим авариям. В 1982 г. на полимерные изоляторы с использованием стеклопластиковых изоляторов увеличенного диаметра была переведена и одна из компактных ВЛ 230 кВ. Всего с 1982 по 1988 гг. на ВЛ 230 кВ было установлено около 3000 таких изоляторов.

Первоначально на ВЛ 230 кВ были установлены полимерные изоляторы с защитной арматурой , а на ВЛ 138 кВ - без неё. Ребристые оболочки изоляторов были выполнены из EPR. Для снижения вероятности каскадных аварий многие продолжающие эксплуатироваться в FPL горизонтальные фарфоровые изоляторы были покрыты защитной ребристой оболочкой из EPR различных изготовителей. Опыт эксплуатации показал , что на защитном покрытии из EPR , достаточно быстро происходят значительные разрушения под одновременным действием электрических нагрузок (особенно при отсутствии защитной арматуры) , ультрафиолетового облучения и солевого загрязнения. Опыт эксплуатации в FPL подвесных полимерных изоляторов / 40 / и ускоренные испытания на старение , проводившиеся FPL , показали , что

кремнийорганические изоляторы лучше других полимерных изоляторов пригодны для региона , эксплуатируемого FPL. Также можно было полагать , что конструкция без ребер на кремнийорганической оболочке будет достаточно надежна и экономична. Всем разработчикам опорных полимерных изоляторов в США была дана возможность предоставить чертежи опорных кремний-органических изоляторов на 230 кВ без ребер на защитной оболочке. Один из представленных кремнийорганических изоляторов без ребер был выбран для эксплуатации в FPL на ВЛ 230 кВ. Он более короткий (длина 2,25 м) , чем изолятор с ребрами , благодаря повышенным характеристикам кремнийорганической резины в условиях загрязнения. Применявшиеся здесь ранее опорные ребристые изоляторы (длиной 2,4 м) с оболочкой из EPР были снабжены экранирующим кольцом у провода для снижения повреждения от короны , а у кремний-органических изоляторов такой защиты от короны не требуется. В 1989- 1994 гг. компания FPL установила на ВЛ 230 кВ около 6400 кремний - органических опорных изоляторов с диаметром тела 7,6 см. В / 40 / приведены подробные данные , характеризующие большую экономическую выгоду применения на компактных ВЛ (с повышенной пропускной способностью) опорных кремнийорганических изоляторов по сравнению с эквивалентными керамическими изоляторами. Предполагавшееся улучшение работы в условиях загрязнения в результате применения кремнийорганических опорных изоляторов было подтверждено 5-летним опытом их эксплуатации на ВЛ 230 кВ в сильно загрязненном районе без перекрытий. Следует отметить , что по длине пути утечки (5,6 м) примененные изоляторы соответствуют II степени загрязнения по стандарту МЭК 815 / 9 / , хотя район их эксплуатации в FPL соответствует III степени загрязнения (интенсивное морское загрязнение). Высокие характеристики кремнийорганических изоляторов были широко использованы в 1992 г. в FPL при восстановительных работах на ВЛ 230 кВ , поврежденных ураганом.

В настоящее время в FPL разрабатываются новые решения конструктивного выполнения ВЛ , использующие уникальные свойства опорных полимерных изоляторов - высокую прочность на изгиб , способность поглощать ударные и вибрационные нагрузки , обеспечивать необходимый прогиб под механической нагрузкой. Ведется разработка комбинированной методики механических испытаний опорных полимерных изоляторов. Всё это должно позволить получить необходимые экологические и экономические выгоды без снижения надежности энергосистемы.

Вследствие широкого внедрения в эксплуатацию в США некерамических изоляторов необычайно обширна американская научно-техническая литература , посвященная различным аспектам исследований характеристик этих изоляторов. Некоторые , наиболее важные результаты этих исследований приведены в разделах 17 - 20 настоящего обзора.

12. Опыт применения полимерных изоляторов в Канаде.

Наиболее подробно об опыте использования полимерных изоляторов в Канаде докладывалось на симпозиуме в Цюрихе (ноябрь 1995 г.) фирмой “ Ontario Hydro Technologies “ (“ОНТ”) / 41 / , а также президентом фирм “ K - Line Insulators “ и “ CSL Silicones “ профессором E.A. Cherney / 42 / .

ОНТ - одно из крупнейших энергопредприятий Северной Америки. Полимерные композитные изоляторы в распределительных сетях среднего напряжения здесь применяются уже 12 лет. Одна из причин их сравнительно широкого применения - замена фарфоровых штыревых изоляторов , часто пробивавшихся на ВЛ при коммутациях. Уже в течение 6 лет полимерные композитные изоляторы довольно широко применяются на действующих и строящихся ВЛ 115 - 230 кВ , ранее на ВЛ этого класса напряжения полимерные изоляторы применялись только на отдельных опорах. В ближайшее время полимерные изоляторы предполагается установить в опытную эксплуатацию на ВЛ 500 кВ в неопасных по загрязнению и климатическим воздействиям районах. Основные причины применения композитных изоляторов в ОНТ : компактизация ВЛ , необходимость втискивания новых ВЛ в уже имеющиеся коридоры , а также борьба с вандализмом.

Хотя в целом район , эксплуатируемый ОНТ , характеризуется слабым уровнем загрязнения , композитные изоляторы применяются энергопредприятием и в районах с повышенными промышленными загрязнениями , в особенности на подстанциях вблизи посыпаемых зимой солью автодорог , где в зимних условиях обмыв изоляторов водой практически невозможен. Реконструированы две ВЛ 115 кВ на участке длиной 50 км , переведенные на 230 кВ с использованием V - образных горизонтальных полимерных изоляторов. В последние 6 - 7 лет в Канаде стали применять полимерные изоляторы и с точки зрения экономической выгоды . В настоящее время стоимость подвешного полимерного изолятора для ВЛ 115 кВ в Канаде практически равна стоимости семи стандартных фарфоровых тарельчатых изоляторов , а затраты на монтаж полимерных изоляторов значительно ниже , чем в случае применения фарфоровых изоляторов. Отмечается , что у нового поколения полимерных изоляторов за 6 - 10 лет эксплуатации практически не наблюдались признаки старения , в то время как у более старых изоляторов были повреждения на границе стержень - оболочка , наблюдалось коронирование и растрескивание ребер. Подчеркивается , что новые изоляторы целиком отливаются методом инъекции. В ОНТ внедрен стандарт на подвесные полимерные изоляторы напряжением до 230 кВ. Приведен пример реконструкции крупной подстанции 230 кВ для улучшения работы её изоляции при зимнем тумане и гололеде (при 0 С). В этих условиях здесь очень часто происходили перекрытия изоляции , загрязненной солью с автодорог. В результате длительной исследовательской работы , включая лабораторные испытания в камере при температуре около 0 С и искусственном загрязнении полимерных изоляторов по методике STRI (сухое распыление загрязнения

без нарушения гидрофобности изоляторов) , были разработаны соответствующие рекомендации. В настоящее время все подвесные и натяжные гирлянды на подстанции заменены на композитные полимерные изоляторы , кремнийорганическое защитное покрытие нанесено на все вводы выключателей и трансформаторов , покрышки измерительных трансформаторов и разрядников , а также на большое число опорных изоляторов. Часть опорных изоляторов подстанции покрыта полупроводящей глазурью. В настоящее время в зимних условиях модернизированная изоляция подстанции работает надежно , хотя срок её эксплуатации ещё очень мал.

13. Опыт эксплуатации и некоторые результаты исследований полимерных изоляторов в Италии

Особо большой интерес вызывают исследования характеристик полимерных изоляторов , проведенные в последние годы в Италии / 15, 43, 44, 45 /. В этой стране , характеризуемой крайне тяжелыми условиями промышленных и морских загрязнений , получен весьма неблагоприятный опыт эксплуатации на ВЛ 132 - 150 кВ в начале 70-х годов композитных изоляторов первого поколения с оболочкой главным образом из политетрафторэтилена / 46 /. На этих изоляторах было отмечено много электрических (пробой , эрозия и др.) и механических (разрыв стержня) повреждений. Поэтому в настоящее время эксплуатационники в Италии уделяют повышенное внимание приемочным (" квалификационным " по итальянской терминологии) испытаниям изоляторов , которые проводятся по более жестким , усовершенствованным методикам и нормам , чем предусмотренные в стандарте МЭК 1109. Эта методика разработана Центральной электро - энергетической лабораторией Италии (CESI). Высказывались опасения, что никакие композитные изоляторы не выдержат особо жесткие испытания , разработанные ещё в начале 80 - х годов. Действительно при соответствующих испытаниях композитных изоляторов старого поколения практически все они повреждались , в то время как современные усовершенствованные изоляторы эти испытания успешно выдержали.

Испытания на старение (трекинг и эрозия) изоляторов для ВЛ 132 - 150 кВ производятся в ENEL в большой испытательной камере (17 x 18 x 15 м³) на полномасштабных изоляторах , большое количество которых испытывается одновременно. Применяется процедура , основанная на повторении недельного цикла , воспроизводящего по заданному графику все основные атмосферные воздействия - соленый туман 80 кг / м³ , деминерализованный дождь 15 мм / мин , увлажнение (пар) 55 г / м² час , солнечное облучение 15 кВт / м² , нагрев поверхности до 60 С , сухие периоды , механические воздействия - вместе с приложением наибольшего рабочего эксплуатационного напряжения 100 кВ. Жесткость некоторых из указанных атмосферных воздействий (предусмотренных стандартом МЭК 1109) при испытаниях в ENEL была усилена , с тем , чтобы они могли охватить все естественные условия на территории

Италии / 43 /. Например , по МЭК 1109 испытания проводятся при солёности только 7 кг / м³.

В стандарте МЭК 1109 предусмотрена проверка стойкости изоляторов только к статическим механическим воздействиям. Для предотвращения опасности разрушения изоляторов в эксплуатации вследствие усталостного старения и химической коррозии стеклопластикового стержня в ENEL на опытном пролёте ВЛ длиной около 100 м были проведены длительные механико - химические испытания. Они в основном воспроизводят динамические изгибающие нагрузки на натяжные полимерные изоляторы , вызванные эоловой вибрацией проводов в сочетании со статической растягивающей нагрузкой. При этих испытаниях создавались динамические изгибающие нагрузки на изоляторы при искусственном возбуждении колебаний провода с частотой 5 - 50 Гц. Установлено , что это воздействие (изгибающее усилие и его усталостное влияние) должно быть учтено при конструировании полимерных изоляторов / 44 /. В лабораторных условиях воспроизводилась амплитуда изгиба изоляторов до 9000 мкм / м с частотой 6,5 Гц . При этом общее число приложенных циклов изгибающих нагрузок , учитывающее количество вибраций , ожидаемых на изоляторе в течение срока его службы , было принято равным 107 (с одновременным приложением статической растягивающей нагрузки). Изоляторы , хорошо проявившие себя в ходе этих испытаний , на заключительном этапе исследований испытывались с четырьмя перерывами по 48 часов , во время которых изоляторы погружались в кислотный раствор с pH = 2. Этим воспроизводилось воздействие в эксплуатации кислотных дождей и туманов , влаги с добавками азотистых газов и других химических агентов. Опыт эксплуатации в Италии первых композитных изоляторов показал , что , если химические агенты проникают в тело изолятора вплоть до стекло- пластикового стержня , на нем начинается процесс коррозии , а также развитие тока утечки на поверхности раздела стержня и оболочки.

Типы изоляторов , проявившие себя в эксплуатации неудовлетворительно , были испытаны по описанной методике и разрушались после 1,4 - 2,0 млн. циклов вибрации. На основе проведенных испытаний рекомендована установка на опытных пролётах с композитными изоляторами демпфирующих устройств , снижающих изгибающие прогибы изоляторов до 4800 мкм / м . Отметим , что большинство хрупких разрушений композитных изоляторов первого поколения в Италии произошло именно в анкерных пролётах , ни один из которых не был оснащён демпфирующими устройствами , и где амплитуда прогиба изолятора при вибрации могла составлять 9000 мкм/ м / 44 /.

Предварительный опыт , полученный в ENEL при длительных электрических и механических испытаниях изоляторов , подтвердил возможность воспроизведения большинства видов загрязнений , наблюдаемых в естественных условиях. Выявлено , что даже при отсутствии явных видимых изменений защитной оболочки выдерживаемое напряжение изоляторов при воздействии солёного тумана 80 кг / м³ после старения в течение 1000 ч. снижалось на 10 - 25 % по сравнению с новыми изоляторами , а для оболочки из PTFE более чем на 40 %. Такое же снижение влагоразрядных напряжений

зарегистрировано при лабораторных испытаниях изоляторов из PTFE , демонтированных с ВЛ после нескольких лет эксплуатации.

Результаты исследований электрического старения полимерных изоляторов первого поколения , выполненных в Италии , обобщены в докладе / 45 /. Ниже рассматриваются результаты итальянских исследований многих типов подвесных композитных изоляторов нового поколения , представленных разными изготовителями и сильно отличающимися в отношении оболочки , поверхности раздела и металлической арматуры / 15, 43 /. Оболочки испытывавшихся в 1988 - 1993 гг. изоляторов были выполнены из этилен-пропиленовой резины (EPR) разной модификации , EPDM и кремнийорганической резины (НТВ , RTV). Длина пути утечки изоляторов (с ребрами постоянного и переменного вылета) составляла 3,1 - 4,7 м. На некоторых из испытанных изоляторов была достигнута длительность испытаний 7000 часов и более. У всех типов изоляторов большие повреждения были зарегистрированы в горизонтальном положении , чем в вертикальном. У изоляторов с оболочками из EPDM наблюдались средняя эрозия сердечника и сильное изменение цвета (мелование) на облучавшейся стороне. У изоляторов с оболочками из EPR наблюдалась слабая эрозия на сердечнике и слабое изменение цвета на облучавшейся стороне. Более сильные повреждения наблюдались на силиконовой резине (НТВ). Средняя эрозия на сердечнике и на верхней части ребер наблюдалась на КО - изоляторе (НТВ - а) при длине пути утечки 3,55 м и сильная эрозия сердечника и ребер на таком же изоляторе другой модификации вулканизации (НТВ - б). Очень сильная эрозия на стержне и ребрах наблюдалась на КО - изоляторах (RTV - а , RTV - б) при длинах пути утечки 4,05 и 4,7 м. Таким образом значительно более сильное старение было получено на КО - оболочках , чем на EPR и EPDM. Этот результат не согласуется с приведенной во многих других публикациях чрезмерно оптимистической оценкой КО - изоляторов и весьма настораживает. Отметим ещё , что при рассматриваемых испытаниях после 4000 - 5000 часов старения сильного увеличения эрозии за время испытаний до 7000 часов не наблюдалось.

Во время длительных испытаний на старение периодически регистрировались токи утечки по поверхности изоляторов. На многих изоляторах , в особенности кремнийорганических , эти токи (импульсы) при соленом тумане составляли сотни мА и нередко превышали 1 А . В целом токи утечки были выше на горизонтальных изоляторах , чем на вертикальных. Некоторые изоляторы при испытаниях на старение переключались после 4000 - 5000 часов испытаний при воздействии соленого тумана. (реже во время увлажнения и дождей).

При соленом тумане 80 кг / м³ по “ быстрой “ методике определялись разрядные напряжения новых изоляторов , а также изоляторов , испытывавшихся на старение после 2000 и 5000 часов. Обнаружено , что снижение напряжения перекрытия по сравнению с новыми изоляторами составляет не более 20 %. Наиболее высокое удельное (по длине пути утечки) разрядное напряжение (0,39 кВ / см) оказалось у одного из изоляторов с оболочкой из EPR - а (переменный вылет ребер , L =3,1 м , L / Низ = 2,74). Установлено , что снижение разрядных напряжений в соленом тумане жестко не связано с

интенсивностью повреждения оболочки. Это показывает, что разрушение оболочки и уровень электрической прочности вдоль её поверхности - два различных процесса, даже если оба они происходят при весьма длительных приложениях рабочих нагрузок на изолятор.

Те типы изоляторов, которые показали лучшие результаты в процессе предварительных испытаний на старение, были испытаны в ENEL по полной программе, последовательно включающей в себя:

а) 2000 часов старения в камере под действием напряжения и окружающей среды;

б) 10 млн. переменных изгибающих циклов с перерывами по 48 часов каждый для погружения изоляторов в кислотный раствор;

в) 3000 часов (для некоторых изоляторов 5000 часов) старения под напряжением и воздействием среды.

Особый интерес представляет критерий оценки результатов рассматриваемых комбинированных испытаний. Изоляторы считают выдержавшими испытания, если:

- отсутствуют повреждения стеклопластикового стержня;
- отсутствуют пробои по поверхности раздела или в стеклопластике;
- не наблюдается отслаивания оболочки или потери внутреннего наполнителя;
- отсутствуют трекинг, глубокая эрозия, пробои ребер;
- выдерживаемая солёность тумана, определенная в соответствии с методикой стандарта МЭК 507 / 47 / , после 3000 часов старения в камере под напряжением и воздействия среды должна быть не ниже 56 кг / м³;
- остаточная деформация в середине изолятора, подвергнутого динамическому изгибу, должна составлять не менее 60 % соответствующего значения, определенного до начала циклов изгиба;
- значение механической прочности на разрыв должно составлять не менее 70 % от первоначального значения.

Только после того, как определенный тип изолятора успешно прошел комбинированные длительные электрические и механические испытания, он признается ENEL годным для всех испытаний конструкции и типовых испытаний, рекомендованных стандартом МЭК 1109. В исследованиях ENEL такими изоляторами оказались два типа с оболочками из EPDM и EPDM (успешно выдержавшие старение в течение 7000 - 8000 часов), у изоляторов из силиконовой резины было очень сильное старение и они не были подвергнуты дальнейшим испытаниям. Результаты испытаний сняли сомнения в

излишней жесткости принятой в Италии процедуры испытаний , высказывавшиеся в частности многими специалистами США. Два вышеуказанных типа изоляторов успешно прошли после испытаний на старение конструктивные и типовые испытания по МЭК 1109. Сейчас планируется установить по тысяче изоляторов каждого типа на ВЛ 132 - 150 кВ , расположенных в различных районах Италии , в основном в условиях сильных осадков , интенсивной солнечной радиации , влаги и т.д. , в том числе там , где композитные изоляторы первого поколения работали неудовлетворительно. По графику намечено осуществлять периодические осмотры изоляторов , они будут периодически демонтироваться и подвергаться лабораторным испытаниям , включая оценку физико - химического состояния материалов и поверхностей раздела композитных изоляторов.

14. Опыт эксплуатации и некоторые характеристики немецких полимерных изоляторов.

Опыт эксплуатации композитных изоляторов первого поколения в Германии подробно рассмотрен на сессиях СИГРЭ 1980 , 1984 и 1986 г.г. / 58 - 60 /. Современный опыт эксплуатации немецких композитных изоляторов достаточно подробно рассмотрен в разделах 8 и 9 настоящего обзора. В этом разделе приводятся некоторые дополнительные данные , касающиеся характеристик композитных изоляторов , выпускаемых двумя крупными фирмами Siemens и Hoechst. Опыт внедрения на рынок композитных изоляторов фирмы Siemens приведен в / 61 /. Эта фирма построила в конце 1995 г. в г Рудвице оснащенный современной технологией цех по производству аппаратных композитных изоляторов площадью 700 м² (объем капиталовложений 5 млн DM). Фирма утверждает , что является единственным производителем в мире , способным изготавливать фарфоровые , эпоксидные и композитные изоляторы для распределительных устройств на напряжения до 500 кВ. В настоящее время фирма Сименс изготавливает только полые композитные изоляторы , но в ближайшем будущем предполагает наладить выпуск композитных изоляторов также и для ВЛ. В / 61 / отмечается , что в 1996 г. мировой рынок полых композитных изоляторов был ограничен скромной величиной 20 млн. долларов США , но этот бизнес постоянно растет. Подчеркивается , что надо не просто заменять фарфоровые покрышки полимерными , а разрабатывать новые конструкции электрооборудования с использованием полимерных изоляторов. Технологию изготовления полимерных изоляторов фирма Сименс приобрела по лицензии у других фирм , считая , что следует экономить время , которое ушло бы на освоение соответствующих разработок своими силами.

Фирма считает , что в ближайшие годы стоимость композитных и фарфоровых аппаратных изоляторов сравняется. Уже сейчас в классе напряжения 420 кВ стоимости одинаковы , а в диапазоне 245 - 300 кВ близки. Более трудно добиться экономического эффекта от применения композитных изоляторов в классе напряжения 110 - 170 кВ. Поэтому в настоящее время фирма концентрирует свои усилия на выпуске композитных подстанционных изоляторов 245-420 кВ в основном с кремнийорганической оболочкой. Фирма Сименс готова выпускать также изоляторы из EPR , если в них возникнет потребность (сейчас лучше покупают КО - изоляторы). По мнению фирмы EPR , как

существующий компромиссный (более дешевый) вариант , постепенно исчезнет с рынка. По пути снижения цен на изоляторы за счет введения наполнителей фирма не пошла , т.к. при этом может резко ухудшиться поведение изоляторов в условиях загрязнения (возникает поверхностная эрозия , обусловленная высокой долей наполнителя). Крупные полые композитные изоляторы фирма Сименс экспортирует в разные страны , в том числе в США. Новая технология в основном связана с герметичным креплением торцевой арматуры к полым изоляторам большого диаметра. Максимальный диаметр стеклопластиковых труб , применяемых фирмой в полых композитных изоляторах 600 мм , их максимальная длина 6 м (более длинные изоляторы трудно транспортировать). Каждая готовая покрывка с фланцами испытывается сжатым воздухом при давлении до 35 бар. После крепления торцевой арматуры на стеклопластик на наружную поверхность полой трубы напыляется специальный подслоя , который обеспечивает прочную связь между силиконом и стеклопластиком.

Напыление подслоя может производиться при вертикальном или горизонтальном положении изолятора , при этом сопла двигаются на строго определенном расстоянии от стеклопластиковой трубы. Другой подслоя (растворитель) наносится кистью на наиболее ответственные места вдоль трубы , где силикон соединяется с силиконом (указывается , что состав этого растворителя и способ его нанесения - строгий секрет фирмы). Имеются две крупные установки для отливки силикона на полые трубы , выпускается около десятка типоразмеров этих труб. Фирма располагает уникальным прибором для полного удаления воздуха из силикона и считает это очень важным своим достижением. Каждый вспрыск литьевой машины может наносить на трубу ребристую оболочку длиной до 2,1 м , т.е. достаточно трех циклов , чтобы покрыть самую длинную трубу. Длительность каждого цикла составляет от 10 до 40 минут в зависимости от диаметра трубы. После инъекционного литья изоляторы вулканизируются в печи в течение около 4-х часов. Последняя стадия производства предусматривает тщательное удаление неровностей на силиконовой оболочке с использованием шлифовального круга. Во время всех технологических циклов трубы передвигаются на специальных тележках, что значительно облегчает весь процесс. Технологический цикл изготовления полого изолятора 500 кВ занимает не менее недели , хотя теоретически такой изолятор может быть изготовлен за 10 часов. Для обеспечения непрерывности цикла специально оговорено , что на складе поставщика всегда должно находиться как минимум три стеклопластиковых трубы требуемого размера.

О результатах исследований характеристик своих композитных изоляторов с оболочками из кремнийорганической резины сообщила фирма Hoechst Ceram Tec. / 62 /. Отмечается , что до 1979 г. в Германии выпускались КО - изоляторы только с оболочкой , вулканизирующейся при комнатной температуре (RTV) и лишь затем начали выпускать изоляторы с НТВ - силиконовыми оболочками с улучшенными свойствами. Оба типа оболочек в настоящее время эксплуатируются в Германии в большом количестве , но всё же в эксплуатации находится уже значительно больше НТВ - изоляторов. Оба типа изоляторов выпускаются в Германии на все классы напряжения до 765 кВ и устанавливаются в районах с различными условиями загрязнения. Опыт эксплуатации ,

по мнению фирмы Hoeschst, полностью положительны. В изоляторах нового поколения применен стеклопластиковый стержень, стойкий к хрупкому излому и гидролизу. На стержень навулканизирована бесшовная экструдированная оболочка. Предварительно отформованные тарелки насажены на оболочку и привулканизированы к ней. Оконцеватели изоляторов изготавливаются из ковanej стали. Зазор между оболочкой и оконцевателем загерметизирован специальным сверхстойким силиконом. Ранее выпускавшиеся РТВ - изоляторы имели стержни, изготовленные из стекла Е и тарелок из силикона РТВ, отлитых и завулканизированных на стержне.

Было испытано большое число кремнийорганических изоляторов (RTV, НТВ), демонтированных с ВЛ 20 - 380 кВ, расположенных в районах со всеми степенями морских и промышленных загрязнений по / 9 /. Длительность эксплуатации демонтированных изоляторов составляла 10 - 20 лет. В качестве примера можно указать, что RTV и НТВ изоляторы 380 кВ, эксплуатировавшиеся в промышленных районах с III степенью загрязнения, имели длину пути утечки 10,25 - 10,5 м. Изолятор 110 кВ, также работавший в районе с III степенью загрязнения, имеет длину пути утечки около 2,7 м, в то время как используемые в том же районе фарфоровые длинностержневые изоляторы требуют длины пути утечки около 4,3 м. Поверхность демонтированных КО - изоляторов не имела повреждений, но значительно потемнела (равномерный слой загрязнения, похожий на копоть, плотно сцепленный с оболочкой изолятора). Все электрические характеристики демонтированных изоляторов соответствовали стандарту МЭК 383. Мокроразрядное напряжение (50 Гц) демонтированных изоляторов 110 кВ составило около 350 кВ, т.е. было практически таким же, как у чистых новых изоляторов. Исследования, проведенные фирмой Hoeschst / 63 /, показали, что пока не найдено объективного критерия, который позволяет оценить степень загрязнения кремнийорганических изоляторов в условиях эксплуатации. По мнению фирмы, для этой цели мало подходят как токи утечки по поверхности увлажненных изоляторов с естественным загрязнением, так и ESDD.

15. Опыт эксплуатации и некоторые результаты исследований полимерных изоляторов в Китае.

Обширностью внедрения полимерных изоляторов в распределительные и магистральные электрические сети выделяется континентальный Китай. Соответствующему опыту эксплуатации посвящено множество публикаций китайских авторов, наиболее полные данные приведены в статье / 64 /, подготовленной сотрудниками Центрального НИИ Энергетики КНР. В настоящее время многие китайские фирмы по национальным и зарубежным лицензиям осуществляют выпуск полимерных изоляторов различного назначения, причем это внедрение идет по трем направлениям: керамические изоляторы с КО - оболочками, полимерные бустерные юбки на керамических подстанционных изоляторах (опорных, вводах), композитные (стеклопластиковые) полимерные линейные изоляторы. Основная причина применения

всех указанных видов полимерных изоляторов в Китае - многочисленные перекрытия традиционных изоляторов ВЛ и ОРУ из-за их загрязнений (природные , промышленные). Пик этих массовых перекрытий , произошедших в Северо-Восточном , Восточном и Северном Китае , пришелся на конец 80-х - начало 90 - х гг. В Китае широкое применение нашли только силиконы , поскольку по мнению китайских исследователей они лучше других полимерных изоляторов (в Китае исследовались также изоляторы из EPDM , эпоксидных смол и др.) сопротивляются воздействию УФ - излучения , озона и коронных разрядов , лучше других противостоят искрению подсушенных зон , трекингу и эрозии. Китайские авторы , как и исследователи других стран , особо выделяют гидрофобность силиконовых изоляторов , которая передается на слой загрязнения и тем самым предотвращает его перекрытие.

Применение в Китае кремнийорганических покрытий керамических изоляторов , вулканизирующихся при комнатной температуре (RTV) , является эффективной мерой защиты от перекрытий загрязненной внешней изоляции. Срок службы этих покрытий до повторного нанесения намного больше по сравнению с применявшимися ранее смазками и воском. Основные характеристики применяемых в Китае покрытий RTV : 10 14 Ом. см , пробивное напряжение 15 кВ / мм , прочность на отрыв 80 Н / см , прочность на задир 1800 Н / м , модуль упругости 39 , сопротивление трекингу TMA 4,5. Испытания изоляторов с искусственным загрязнением по методу твердого слоя (ESDD =0,1 - 0,4 мг / см²) , выполненные в 3 - х лабораториях Китая , показали , что разрядное напряжение изоляторов с RTV выше чем у тех же изоляторов без покрытия (с тем же слоем загрязнения) в 1,5 - 2,5 раза. Напряжение начальной короны у подвесных изоляторов с RTV покрытием выше , чем у изоляторов без покрытия , на 30 % в сухом состоянии и на 18 % под дождем. Первые RTV покрытия изоляторов на ВЛ 35 - 110 кВ были опробованы в Китае в середине 80 - х годов. В настоящее время их применение на ВЛ расширилось для решения проблемы надежной работы изоляторов в загрязненных районах. Получены первые положительные результаты применения RTV покрытий на подстанционных изоляторах. В прибрежном районе и в районах с химическими загрязнениями применение RTV покрытий позволило полностью исключить имевшие место ранее частые перекрытия изоляции. По состоянию на 1992 г. в Китае RTV были покрыты тысячи опорных изоляторов и вводов , на что ушло 3 т RTV силикона. Технология нанесения покрытий была ручной и это в ряде случаев приводило к утрате эффективности покрытия из-за плохой его адгезии к фарфору между ребрами. В последние годы появилось новое RTV покрытие американской фирмы Dow Corning Co. В сильно загрязненных районах Северного Китая на опорные изоляторы было нанесено 150 кг такого покрытия. На двух преобразовательных подстанциях постоянного тока 500 кВ (Центральный и Восточный Китай) на 24 ввода (горизонтальных и вертикальных) с 1991 г. было нанесено более 500 кг RTV покрытия Dow Corning Co. Раньше на этих вводах было много перекрытий при дожде и тумане , приходилось применять обмыв или снижать рабочее напряжение. За 1991 - 1994 гг. на всем оборудовании с RTV покрытием короны и перекрытий не наблюдалось. В настоящее время продолжаются испытания рассматриваемого покрытия на старение , а также сопоставления этого покрытия с

другими типами RTV покрытий. В Китае всё же опасаются , что срок службы RTV покрытий вследствие трека и эрозии может оказаться недостаточным.

В настоящее время за рубежом (Индия , Египет , Австралия и др.) достаточно широко применяются полимерные бустерные юбки , удлиняющие путь утечки керамических подстанционных изоляторов. Рассмотрим , как решается эта проблема в Китае , где , как и в Индии , применение бустерных юбок считается наиболее эффективным и экономичным способом предотвращения перекрытий вследствие загрязнения. Такие юбки применяются в Северо - западном и Восточном Китае с середины 80 - х годов. Этим способом удалось полностью исключить перекрытия при дожде трансформаторных вводов переменного тока 500 кВ и опорных изоляторов на ОРУ 110 - 330 кВ (загрязнение углем , цементом , уносами химических и металлургических заводов , морской солью). Наибольший срок эксплуатации бустерных юбок 9 лет , средний срок эксплуатации по 9 подстанциям - 4,5 года. По данным заводов - изготовителей на 1992 г. изготовлено около 300 тысяч штук (!) бустерных юбок и удлинителей пути утечки. Они изготавливаются из пластмасс , эпоксидных смол , силикона и поперечно связанных термоусадочных материалов. Ранее применявшиеся изделия из пластмасс и эпоксидной смолы были более дешевыми , имели меньший вес , просты для монтажа и обслуживания. Однако они характеризовались низкой дуговой стойкостью и имели более короткий срок службы. Силикон же обладает превосходной гидрофобностью , эффективно противостоит тепловому , ультрафиолетовому и окислительному разрушению. Для силиконовых удлинителей пути утечки основной проблемой является прочность клейки. Поперечно связанные термоусадочные материалы находятся в стадии экспериментальной проверки и их опыт эксплуатации ещё не накоплен.

Опыт эксплуатации в Китае кремнийорганических композитных подвесных изоляторов распространяется главным образом на районы с сильным загрязнением , вандализм по отношению к изоляторам в Китае (характерный для США и Европы) практически отсутствует. Впервые в Китае композитные изоляторы были использованы в контактной сети железных дорог , а в начале 80 - х гг. начата опытная эксплуатация таких изоляторов на ВЛ напряжением 220 кВ и ниже. Общее число эксплуатируемых в Китае композитных изоляторов в 1990 г. составляло всего лишь около 3000 шт. , при этом они использовались в 10 районах : на ВЛ напряжением ниже 66 кВ - 66 шт. , 110 кВ - 2001 шт. , 220 кВ - 77 шт. В Китае имеется собственное сырьё для производства изоляторов (кремнийорганика , стеклопластик) и в настоящее время действуют десятки мелких производств для изготовления композитных изоляторов на напряжение 35 - 500 кВ переменного тока и на механические нагрузки 70 - 210 кН. С 1990 г. применение композитных изоляторов в Китае резко увеличилось , в эксплуатации уже находятся десятки тысяч подвесных изоляторов , в том числе 5 тыс. шт. установлено на ВЛ 500 кВ (из них 4 тыс. шт. фирм Reliable и Hoechst). Некоторые ВЛ уже полностью оснащены композитными изоляторами. Например , в Северном Китае на ВЛ 110 - 220 кВ работает около 9,5 тыс. таких изоляторов , а на ВЛ 500 кВ около 3,5 тыс. шт. Благодаря их

применению удалось полностью исключить часто происходившие ранее перекрытия линейных изоляторов вблизи химических и металлургических предприятий.

Первые серии композитных изоляторов имеют срок службы не более 5 - 8 лет , типичными проблемами в эксплуатации были : разрушение вдоль границы стеклопластик - оболочка , перекрытия первого поколения композитных изоляторов при сильных загрязнениях, перекрытие с обгоранием оболочки и экранной арматуры при грозовых перенапряжениях , снижение механической прочности после нескольких лет эксплуатации (в одном случае после 2 - х лет работы на ВЛ механическая прочность на растяжение 3 - х изоляторов 110 кВ снизилась до 70 % нормированной прочности). Наблюдались и другие повреждения композитных изоляторов : растрескивание и поломка ребер при транспортировке , обгрызание оболочек грызунами на складе, исклевывание птицами во время эксплуатации , а также порча по другим причинам. В силу указанных причин надежность композитных изоляторов в Китае признается недостаточной и ведутся соответствующие проработки по усовершенствованию конструкции изоляторов. Прорабатываются вопросы применения композитных изоляторов в зонах интенсивной грозовой активности , повышения надежности крепления концевой арматуры , контроля за изменением механических характеристик изоляторов в процессе эксплуатации.

16. Опыт применения полимерных изоляторов в Швейцарии.

Некоторые сведения о применении полимерных изоляторов в Швейцарии приведены в статьях / 65 , 66 / , подготовленных директором швейцарской фирмы Sefag AG , изготавливающей полимерные изоляторы с кремнийорганической оболочкой. Эти изоляторы применяются в контактной сети 15 кВ электрофицированных железных дорог и на ВЛ напряжением до 400 кВ. На таких изоляторах в Люцерне построена компактная ВЛ 50 кВ с ребристыми КО - распорками. Всего на 1990 г. в электроустановках Швейцарии разных классов напряжения эксплуатировалось около 20 тыс. композитных изоляторов , из них около 10 тыс. шт. выпущенных фирмой Sefag. Наибольшая длительность эксплуатации этих изоляторов в Швейцарии на 1990 г. составляла около 10 лет. В / 66 / проанализирована эффективность четырех принципиально различных (использованных фирмой на практике) способов крепления оконцевателей на стеклопластиковом стержне : коаксиальной опрессовки , клиновой заделки , конусной заделки (с заливкой смолой) и двусторонней опрессовки. Указано , что все способы крепления оконцевателей в той или иной степени снижают прочность стеклопластикового стержня , так как создают в нём увеличенные локальные механические напряжения. На изоляторах со всеми четырьмя такими креплениями оконцевателей фирма экспериментально определила зависимость “ растягивающая нагрузка - время “ в диапазоне до 10 тыс. часов. Практически не было выявлено снижение механической прочности только при коаксиальной опрессовке. Этот способ крепления принят фирмой в производстве , при этом указывается , что технология опрессовки является секретом фирмы. У других способов крепления снижение механической прочности на растяжение

за 10 тыс. часов составило 12 - 15 % от кратковременной прочности до начала длительных испытаний. Sefag считает, что при коаксиальной опрессовке прочность композитных изоляторов на разрыв составляет не менее 80 % прочности применяемого стеклопластикового стержня (последняя оценивается величиной 1200 - 1300 МПа). При других способах крепления оконцевателей прочность изоляторов при растяжении по данным фирмы намного ниже (в 2 раза и более), чем прочность стеклопластикового стержня. Более подробно вопрос о снижении механической прочности композитных изоляторов при длительном воздействии растягивающей нагрузки рассматривается в разделе 21.

Фирмой Sefag проведены также исследования разрывной прочности стеклопластиковых стержней, изготовленных на основе стекол различного состава. Растягивающая нагрузка прикладывалась после погружения стержней в слабый кислотный раствор. После 160 часов кислотного воздействия кратковременная разрывная прочность применявшегося ранее стеклопластика на основе Е - стекла снизилась в 5 раз, а прочность стеклопластика на основе специального, стойкого к кислотным воздействиям стекла (" ECR - стекло ") снизилась только на 5 %. После получения указанных данных фирма перешла на серийное использование в композитных изоляторах стеклопластика на основе ECR - стекла, что, по убеждению фирмы, гарантирует высокую сопротивляемость изоляторов хрупкому излому.

17. Применение кремнийорганических защитных покрытий на фарфоровых и стеклянных изоляторах.

В настоящее время хорошо зарекомендовавшие себя в эксплуатации кремнийорганические оболочки (силиконы) используются не только путем нанесения их на стеклопластик в композитных изоляторах (наиболее широкая область применения), но и используются также за рубежом путем нанесения на фарфоровые подстанционные изоляторы и значительно реже на стеклянные и фарфоровые линейные изоляторы. Такие покрытия применяют для повышения надежности работы изоляторов в сильно загрязненных районах. Наиболее часто эти покрытия именуются в литературе RTV - покрытиями (" вулканизация при комнатной температуре "). Подробное рассмотрение широкого круга проблем, связанных с применением кремнийорганических оболочек на фарфоровых (стеклянных) изоляторах, которым в последние годы посвящено очень большое число публикаций в научно-технической литературе /76 - 89 /, выходит за рамки настоящего обзора. Однако, кратко на современном состоянии рассматриваемого вопроса, изложенном в /42, 75 /, целесообразно остановиться.

Многие авторы указывают, что важен не только состав покрытия и технология его нанесения, но и мастерство наносящего его оператора. К 1996 г. накоплен обширный 8 - 9 летний опыт эксплуатации таких покрытий. В основном этот опыт положителен, но

наблюдались также случаи деполимеризации оболочек в процессе эксплуатации (как в нормальной , так и в кислотной средах). Деполимеризация наблюдается , если кремнийорганическое покрытие имеет посторонние примеси , разрывающие длинные полимерные цепи. Другой вероятной причиной этого явления может быть корона. На ряде подстанций в США на опорных изоляторах материал оболочки стал хрупким , легко отделяемым от фарфора. В других случаях материал покрытия становился мягким , подобным замазке. Хотя случаев положительного применения RTV - покрытия описано очень много, случаи выхода их из строя , приведенные в / 42 / , показывают , что проблема надежной работы этих покрытий ещё полностью не решена. Толщина покрытия должна обеспечить восстановление гидрофобности после периода длительного увлажнения (все RTV - оболочки в таких условиях хотя бы временно , но теряют гидрофобность). Момент времени , когда требуется обмыв или замена оболочки обычно определяется по сильному увеличению акустического шума на подстанции. Это является показателем того , что оболочки начинают утрачивать гидрофобность (появляется большой ток утечки , корона и искрение на подсушенной зоне). Случаи реального повторного нанесения оболочки на фарфор вследствие выхода первоначально нанесенной пленки из строя пока не известны. Прогнозируемый срок службы оболочек пока не установлен , хотя ясно , что у хороших оболочек , он достаточно большой. (первые кремнийорганические оболочки были применены примерно 20 лет назад и некоторые из них ещё работают). Считается , что кремнийорганическая оболочка , если она не подвергается деполимеризации и хорошо соединилась с фарфором , должна работать очень длительное время , возможно столько же , сколько и фарфор. Однако , если загрязнение начинает накапливаться на поверхности изолятора и низкомолекулярные частицы перестают проникать в слой загрязнения для передачи ему гидрофобности , кремнийорганическая оболочка может отслаиваться. Когда характеристики изолятора , покрытого оболочкой , станут такими же , что и у изолятора без оболочки , наступает время необходимости вмешательства (обмыв , чистка , нанесение нового слоя RTV или и то , и другое).

В районах с загрязненной атмосферой применение RTV - покрытий позволяет либо исключить обмыв (чистку) изоляторов , либо сократить период между обмывами в 3 - 5 раз. Например , на ОРУ 230 кВ вблизи цементных заводов в Канаде применялся ежемесячный обмыв , но перекрытия не удавалось полностью исключить. Кроме того в рассматриваемых условиях / 42 / изоляторы постепенно покрывались плохо удаляемой обмывом коркой загрязнения , удаление которой специальными средствами обходится очень дорого. Применение RTV - покрытия на этом ОРУ позволило увеличить интервал между обмывами до года , при этом сама чистка (обмыв) существенно облегчается. Обмыв под давлением (вплоть до 1200 фунт / на кв.дюйм) при этом не разрушает силиконовую оболочку и не срывает её с фарфора , если она нанесена на чистый и сухой изолятор. Если же перед нанесением покрытия поверхность фарфора очищена недостаточно хорошо , адгезия покрытия к фарфору может оказаться недостаточной. Стандартных требований к толщине покрытия не имеется. Например фирмой “ CSL Silicones “ в качестве оптимальной рекомендована толщина 0,015 - 0,020 дюйма (при толщине 0,01 дюйма и менее под слоем оболочки начинает просматриваться фарфор).

Для повторного нанесения удаление прежней оболочки , как правило , не требуется , если полимерный материал попрежнему хорошо соединен с керамической подложкой. Однако , если имеются признаки плохой адгезии (видны пузырьки или мойка водой под давлением отслаивает оболочку) , рекомендуется удалить старую оболочку перед нанесением новой.

В настоящее время на подстанциях за рубежом наблюдается явно выраженная конкуренция между применением композитных изоляторов и изоляторов с RTV - покрытиями. Как показывает опыт , в загрязненных районах с длительными , например , морскими увлажнениями кремнийорганика рано или поздно утрачивает свои свойства. В этом случае при весьма возможном разрушении оболочки на композитных изоляторах обнажается стеклопластиковый сердечник , и как правило , вдоль него происходит трекинг с очень вероятным полным механическим разрывом изолятора и с тяжелым отказом электроустановки. Поэтому в тяжелых условиях загрязнения в настоящее время энергопредприятия в различных частях мира всё чаще переходят к использованию фарфоровых и стеклянных изоляторов с RTV - оболочкой. При этом учитывается , что , обеспечивая гидрофобность и достаточно продолжительный срок службы в условиях загрязнения , RTV - оболочка даже в случае потери ею гидрофобности и перекрытия изолятора , как показывает опыт , не отслаивается от него , а сам изолятор сохраняет свою механическую прочность. О высокой репутации современных RTV - оболочек свидетельствует следующий пример. В Катаре в 1995 - 1996 годах введены в эксплуатацию две ВЛ 220 кВ , на которых установлено около 30 тысяч стеклянных подвесных изоляторов аэродинамического типа (с полусферической тарелкой) с предварительно нанесенной в стационарных условиях RTV - оболочкой. Ожидается , особенно в Азии , расширение применения на ВЛ изоляторов с предварительно нанесенной оболочкой в районах , где возникали проблемы с композитными кремнийорганическими изоляторами , а также в районах , где вследствие больших солевых загрязнений нет альтернативы применению RTV - покрытий. Большая возникающая при этом проблема - обеспечение упаковки изоляторов , изготовленных в заводских условиях , для безопасной для оболочек транспортировки. Поэтому разрабатываются проекты массового нанесения оболочки на изоляторы в полевых условиях до установки их на ВЛ. Известны отдельные , не получившие большого распространения , случаи нанесения RTV - оболочек непосредственно на изоляторы действующих ВЛ 115 кВ в Северной Америке. В Азии больше интерес к нанесению оболочек на линейные изоляторы , чем на подстанционные , тогда как в Северной Америке наоборот. Кроме того в Азии районов с сильными природными загрязнениями , где требуются изоляторы с RTV - оболочками , намного больше , чем в Северной Америке , где регионы с загрязнением составляют менее 10 %.

Подробный технологический регламент по применению защитных RTV - покрытий на фарфоровых изоляторах приведен в руководстве / 75 / , подготовленном Аризонским университетом США. В нем приведены рекомендуемые методы очистки изоляторов от загрязнения , произведено сравнение физико-химических характеристик гидрофобных углеводородных смазок (давно применяемых для защиты изоляторов при сильных

загрязнениях) и кремнийорганических RTV - покрытий , рекомендованы способы их нанесения , дана сравнительная оценка трекинговой стойкости и эффективности различных покрытий , приведены данные по опыту их эксплуатации и предполагаемому сроку службы. Кратко опыт эксплуатации RTV - покрытий в США приведен в табл. 6 . Все приведенные в этой таблице энергопредприятия сообщили о положительном опыте эксплуатации RTV - оболочек. Во всех случаях , приведенных в табл. 6 , другие методы (обмыв , применение гидрофобных смазок) не были эффективны , до применения RTV - покрытий наблюдались частые случаи перекрытий загрязненных изоляторов. В то же время сообщается / 75 / , что в США наблюдались случаи , когда неправильное нанесение оболочек (например , на изоляторы с явно недостаточной длиной пути утечки или использование покрытий на изоляторах без защитной арматуры) приводило к утрате гидрофобности оболочек и перекрытиям.

Таблица 6

Опыт эксплуатации RTV - оболочек на фарфоровых изоляторах в США

Эксплуатирующая организация	Загрязнение	Тип покрытой изоляции	Класс напряжения, кВ	Длительность эксплуатации , г
PG and E , Калифорния	Соленый туман с океана	Изоляторы , плавкие предохранители, вводы	12 - 230	20
NE Utilities Коннектикут	Соленый туман	Подстанционные изоляторы	345	4
LADWP Калифорния	Соленый туман	Линейные вводы , электропередачи пост. тока , изоляторы электропередачи пост. тока	133 - 500 пост. тока 138 переменного тока	13

Продолжение табл.6

ConEd , Нью - Йорк	Морское и соль с дорог	Подстанционные изоляторы	69 - 345	7
Idaho Power Айдахо	Фосфорные удобрения	Подстанционные изоляторы	13,8 - 138	9
Newada Power , Невада	Угольная пыль	Подстанционные изоляторы	69 - 230	8
FPL , Флорида	Морское	Подстанционные	13 - 138	4

		онные изоляторы , гирлянды изоляторов		
Southern Cal Эдисон	Морское и промышлен- ное	Подстанци- онные изоляторы , гирлянды изоляторов	56 - 220	9
BPA , Орегон	Цемент , промышлен- ные , удобрения	Подстанци- онные изоляторы	56 - 220	9
CP and L, Техас	Морское	Подстанци- онные изоляторы , гирлянды изоляторов	138 - 345	8
FP Corp. , Флорида	Фосфатная промышлен- ность	Подстанци- онные изоляторы , гирлянды	115	4
Itaipu , Бразилия	Пыль с дорог	Линейные вводы , подстанци- онные изоляторы	400 постоянного тока	9

Стоимость RTV - оболочек выше , чем у смазок , но если отнести её к сроку службы , она оказывается ниже , чем у смазок , т.к. частота нанесения RTV - оболочек значительно более редкая , кроме того удаление смазок для повторного нанесения более трудоёмко , чем подготовка к новому нанесению RTV. Как правило , RTV - оболочки в США наносят один раз и обмывают через 7 - 10 лет эксплуатации. Приведены конкретные экономические выгоды , полученные разными энергокомпаниями от внедрения RTV - оболочек / 75 / в районах с загрязненной атмосферой. В последние годы для RTV - оболочек на первый план выходит определение поверхностной проводимости при искусственном увлажнении , как показателя гидрофобности и старения, однако соответствующая методика ещё только разрабатывается. Наиболее надежным методом оценки RTV - покрытий в настоящее время признается накопление опыта их эксплуатации в естественных условиях.

Основными проблемными вопросами , связанными с применением защитных RTV - покрытий за рубежом , являются разработка методики надежного прогнозирования их срока службы (в первую очередь , определяемого ресурсом низкомолекулярных

соединений в тонком кремнийорганическом слое) и методики сравнительной оценки в лабораторных условиях эффективности RTV - оболочек разного состава.

18. Применение полимерных изоляторов на ВЛ постоянного тока.

В последнее время существенно расширилось применение полимерных изоляторов на электропередачах постоянного тока напряжением до + 500 кВ / 4 /. Появились также многочисленные исследования , посвященные лабораторным испытаниям полимерных изоляторов и , в основном , проблеме старения изоляторов при постоянном напряжении. Не останавливаясь на всех аспектах проблемы отметим , что наиболее подробные данные лабораторных испытаний полимерных изоляторов на постоянном напряжении приведены в докладе СИГРЭ - 94 / 15 / , подготовленном совместно итальянскими и индийскими исследователями в связи с намечаемым в Индии строительством электропередач постоянного тока. Испытывалось 9 типов изоляторов , предназначенных для работы на ВЛ 150 кВ переменного тока (наибольшее рабочее напряжение 170 кВ). Оболочки изоляторов были выполнены из EPDM , EPR и КО - резины (RTV , НТВ). Изоляционная высота всех испытуемых изоляторов была примерно одинаковой (1,15 - 1,27 м) , а длина пути утечки находилась в пределах от 3,1 до 4,05 м. Изоляторы имели как постоянный , так и переменный вылет ребер. Испытания проводились по той же методике и в той же испытательной камере , что и выше описанные испытания на переменном напряжении / 43 /. Отметим , что для Индии , как и для Италии , характерны интенсивные морские (солевые) загрязнения высоковольтной изоляции. Если при испытании переменным напряжением изоляторы испытывались при 100 кВ , то при постоянном напряжении на них длительно подавалось 70 кВ (отрицательная полярность). В течение всех длительных испытаний на старение допускалось не более 3 - х перекрытий изоляторов данного типа , после чего испытания этих изоляторов прекращались. В докладе / 15 / сообщается о наработанной длительности испытаний на старение на постоянном напряжении 3000 часов. Токи утечки (в режиме соленого тумана) были в целом на постоянном напряжении заметно меньше , чем на переменном. Однако , в отличие от опытов в / 43 / на постоянном напряжении почти все испытуемые типы изоляторов неоднократно перекрывались при соленом тумане , причем при заметно меньших временах старения , чем при переменном напряжении. Особенно плохо вели себя в этом отношении кремнийорганические изоляторы. Описываемая методика испытаний сочетает старение изоляторов с оценкой их длительной электрической прочности и позволила авторам исследования сделать вывод , что постоянное напряжение 70 кВ (отрицательная полярность) является более опасным с точки зрения перекрытия полимерных изоляторов , чем 100 кВ переменного тока при тех же окружающих условиях (возможно вследствие большего накопления загрязнения на поверхности изоляторов при длительном приложении постоянного напряжения). Также большей загрязняемостью могут быть объяснены низкие напряжения перекрытия на постоянном напряжении горизонтально расположенных изоляторов. Изменение поверхности изоляторов после испытаний на постоянном напряжении в основном были

практически такими же , как и описанные в / 43 / при переменном напряжении (см. выше). Особо большие повреждения получили изоляторы с оболочкой из кремнийорганической резины при их горизонтальной установке. В среднем снижение разрядных напряжений , полученных по ускоренной методике , при увлажнении соленым туманом составило для состаренных изоляторов около 10 % для переменного и около 20 % для постоянного тока. Соотношение между разрядными напряжениями на постоянном и переменном напряжении при солености 80 кг / м³ составляет в среднем 0,85 для новых изоляторов и 0,75 для состаренных изоляторов. Не обнаружено видимой корреляции между увеличением поверхностной проводимости и повреждениями поверхности изоляторов. Это означает , что эрозия поверхности защитной оболочки и изменение разрядного напряжения вдоль этой поверхности на постоянном напряжении два независимых процесса , хотя оба они обусловлены большими длительностями приложения различных эксплуатационных воздействий.

В целом результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод , что проблема поверхностного разрушения не ограничивает применение изоляторов , эффективно использовавшихся на переменном токе , в электропередачах постоянного тока. Основная существующая для постоянного напряжения проблема - обеспечить надежную работу полимерных изоляторов в загрязненных районах. Дополнительная специфическая проблема - коррозия металлических оконцевателей изоляторов на постоянном напряжении.

19. Испытания некерамических изоляторов при искусственном загрязнении.

В последние годы за рубежом все большее внимание уделяется проблеме испытаний некерамических изоляторов при их искусственном загрязнении (ИЗ) , как фактору существенно определяющему пригодность изоляторов для эксплуатации в районах с той или иной степенью естественного загрязнения. В значительной мере актуальность этой проблемы вызвана неоднозначным опытом эксплуатации полимерных изоляторов в районах с сильными загрязнениями. Подавляющее большинство результатов исследований в этом направлении опубликовано американскими специалистами. Проблемой искусственного загрязнения полимерных изоляторов в настоящее время занимается рабочая группа СИГРЭ 33. 04 , а также две рабочих группы IEEE. Особо важен этот вопрос для некерамических подстанционных изоляторов , у которых теряется преимущество малого диаметра , характерного для композитных линейных изоляторов. В России методика испытаний некерамических изоляторов при ИЗ проработана достаточно глубоко и даже предложены нормы по электрической прочности полимерных изоляторов при ИЗ , включенные в стандарт / 48 /. Разработан также проект соответствующих методик испытаний и норм для опорных полимерных изоляторов. За рубежом нормативных требований ещё не имеется и обширные исследования связаны с поиском наиболее приемлемой методики лабораторных испытаний некерамических изоляторов при ИЗ. В очень многих зарубежных публикациях отмечается , что испытания

полимерных изоляторов при ИЗ являются серьезной и полностью ещё не решенной технической проблемой , хотя и имеется ряд заслуживающих внимания предложений.

В естественных условиях эксплуатации под действием климатических факторов и атмосферных загрязнений в течение достаточно длительного времени (не менее 1 года) на полимерных изоляторах образуется установившийся слой загрязнения. Задачей лабораторных испытаний при ИЗ является нанесение за короткое время такого загрязнения , которое :

- обеспечивает равномерный и воспроизводимый от опыта к опыту

по своим параметрам поверхностный слой;

- по своим физико-химическим характеристикам соответствует

загрязнению некерамических изоляторов в естественных условиях;

- дает возможность нормирования параметров слоя загрязнения

(ESDD ,) , эквивалентных заданным условиям работы

изоляторов в эксплуатации.

Известно , что в лабораторных условиях ИЗ плохо прилипает к поверхности новых некерамических изоляторов , загрязнение получается неравномерным (пятнистым) , кроме того вследствие гидрофобности их поверхность плохо смачивается при искусственном увлажнении. Поэтому некерамические изоляторы необходимо тем или иным способом подготовить к нанесению ИЗ. По существу это означает , что перед нанесением по возможности равномерного слоя ИЗ поверхность нового некерамического изолятора нужно предварительно искусственно состарить , но при этом обеспечить , чтобы после нанесения загрязнения все параметры поверхностного слоя полимерной оболочки полностью восстановились. Предложено очень много методов быстрого загрязнения некерамических изоляторов , см., например, / 49 - 56 / , но ни один из них не дал полностью приемлемого результата (представляющие большой интерес новейшие японские предложения приведены в разделе 9 настоящего обзора). С другой стороны , метод испытаний при ИЗ после длительного старения в естественных условиях также мало приемлем , т.к. требует значительного времени. При общей оценке предлагаемых методов подготовки надо учитывать , что механические и химические воздействия на поверхность изоляторов не отражают изменения гидрофобности поверхности некерамических изоляторов в естественных условиях , а лабораторные методы , связанные с достаточно длительным циклическим воспроизведением климатических факторов , трудоёмки и более подходят для испытаний на старение.

Для подготовки некерамических изоляторов к испытаниям при ИЗ предлагались следующие способы :

- предварительная длительная экспозиция изоляторов в действующих электроустановках или на испытательных стендах ;
- протирка поверхности изоляторов каолином или другим инертным веществом ;
- протирка поверхности изоляторов различными абразивными материалами при помощи различных приспособлений ;
- использование пескоструйных устройств или других способов механической обработки ;
- очистка изоляторов с использованием спирта перед испытанием в чистом тумане ;
- применение смачивающих веществ (фото-фло , детергенты) ;
- предварительное покрытие цементом с последующим воздействием чистого или проводящего тумана ;
- длительная обработка поверхности изоляторов частичными разрядами в чистом или соленом тумане ;
- циклическое нанесение и смыв предварительного загрязнения с приложением напряжения и без него ;
- выдержка изоляторов под напряжением с обработкой загрязняющим веществом в воздушном потоке с одновременным увлажнением чистым туманом ;
- воздействие климатических факторов (солнечной радиации , температуры , влаги , чистого и соленого тумана) и рабочего напряжения ;
- другие комбинированные методы воздействия на поверхность некерамических изоляторов.

Практически все приведенные методы применяются при испытаниях некерамических изоляторов на искусственное ускоренное старение , откуда они были перенесены на подготовку поверхности изоляторов для обеспечения испытаний при ИЗ , однако полностью положительного результата достичь при этом не удалось. В докладе на СИГРЭ - 94 / 14 / приведены результаты сопоставления эффективности различных способов подготовки поверхности некерамических изоляторов для испытаний при ИЗ. В

итоге в качестве наиболее воспроизводимого метода подготовки (при использовании загрязнения способом окунания изолятора в стандартную суспензию) рекомендовано воздействие соленого тумана и солнечной радиации , хотя и этот метод признается недостаточно удовлетворительным.

Важно отметить , как весьма неблагоприятное обстоятельство, что от способа подготовки очень сильно зависят разрядные характеристики изоляторов даже при одинаковых параметрах слоя ИЗ (, ESDD).

Сравнение разных методов искусственной подготовки с состоянием поверхности изоляторов , состаренных в естественных условиях различных районов США , показало , что ни один из методов не дает того состояния поверхности , которое имеет место в естественных условиях. В / 14 / сделан вывод , что наиболее соответствует естественным условиям длительное испытание изоляторов в камере ускоренного старения , но этот метод трудоёмок и не может быть многократно повторен на полномасштабных изоляторах.

Целесообразно особо отметить работу / 54 / , в которой описан метод искусственного загрязнения некерамических изоляторов без значительного изменения поверхности физическими и химическими методами , сходный с японской методикой / 16 /. В основном он заключается в нанесении каолинового порошка на поверхность изолятора перед его загрязнением способами разбрызгивания или окунания по стандартной американской методике / 57 /. В этой же работе показано , что использование стандартного расхода пара (50 г / м³ час) , установленного для фарфоровых изоляторов в США при испытаниях методом чистого тумана , приводило к завышенным значениям разрядных напряжений изоляторов с кремнийорганической оболочкой. Значительное снижение разрядного напряжения (примерно в 1,5 раза) получено при больших расходах пара , обеспечивающих лучшую смачиваемость поверхности изоляторов. Это явление , по мнению авторов / 54 / , согласуется с отмеченными перекрытиями в эксплуатации (США) кремнийорганических изоляторов при интенсивных увлажнениях.

Другая серьезная проблема , сопровождающая испытания при искусственном загрязнении - определение времени , необходимого для восстановления поверхностных свойств полимерной оболочки , т.е. интервала времени от загрязнения изоляторов до начала высоковольтных испытаний. Некоторые лаборатории предлагают делать паузу между загрязнением и приложением напряжения от 8 до 24 часов (для восстановления гидрофобности) , в других лабораториях испытания проводятся сразу же после загрязнения изоляторов. Чаще всего при испытаниях искусственно загрязненных некерамических изоляторов применяют метод чистого тумана или метод соленого тумана , в основном соответствующие стандарту МЭК / 47 /.

Наиболее приемлемым методом испытаний некерамических изоляторов при ИЗ за рубежом считается метод длительного приложения напряжения в двух альтернативных вариантах :

- метод чистого тумана , подаваемого на предварительно загрязненные изоляторы , находящиеся под напряжением ; при использовании этого метода требуется предварительная подготовка поверхности изоляторов;
- метод соленого тумана , когда чистые изоляторы включают под напряжение , а затем начинается увлажнение туманом с различным содержанием соли; в этом случае предварительная подготовка поверхности изоляторов , как правило , не требуется.

Быстрые методы чистого тумана и соленого тумана , используемые с целью сокращения времени испытаний / 52 / , дают для некерамических изоляторов ошибочные результаты , т.к. повторные перекрытия приводят к систематическому снижению разрядных напряжений изоляторов вследствие постепенного ухудшения гидрофобности их поверхности , вызванного действием электрических разрядов / 14 /.

Во многих зарубежных публикациях указывается , что разрядные напряжения , полученные в лабораторных условиях при ИЗ, обычно получаются значительно ниже , чем в реальных условиях. Приведение методики лабораторных испытаний в соответствие с эксплуатационными характеристиками загрязненных некерамических изоляторов является пока нерешенной важной исследовательской задачей.

Анализ литературных данных показывает , что на разрядные характеристики некерамических изоляторов при искусственном загрязнении сильное влияние оказывают:

- тип и содержание ионообразующей составляющей в загрязняющем веществе ;
- тип и содержание инертной составляющей в загрязняющем веществе ;
- степень неравномерности загрязнения ;
- время , прошедшее от момента загрязнения до начала испытания ;

- способ приложения напряжения к загрязненному изолятору ;
- способы определения характеристик слоя загрязнения (ESDD ,)

По всем этим факторам в зарубежной литературе имеются отдельные предложения , но единого согласованного подхода пока не выработано. Ясно лишь , что методы испытаний , применяемые для фарфоровых и стеклянных изоляторов по стандарту МЭК / 47 / для некерамических изоляторов должны быть существенно переработаны. Воспроизводимые результаты испытаний при искусственном загрязнении некерамических изоляторов могут быть получены только при однозначной и жесткой регламентации всех этапов подготовки и проведения испытаний изоляторов. При отсутствии единой методики испытаний (единое загрязняющее вещество , унифицированный метод подготовки изоляторов , один и тот же метод увлажнения , одинаковый способ приложения напряжения и т.д.) можно получить существенно разные значения разрядных напряжений изоляторов.

Нерешенной дискуссионной проблемой остается также согласование критерия , по которому возможна наиболее правильная оценка степени загрязнения некерамических изоляторов (как при ИЗ , так и в естественных условиях). Целесообразность применения ESDD для этой цели в настоящее время находится под вопросом , т.к. вследствие гидрофобности поверхности некерамических изоляторов не весь слой их загрязнения участвует в процессе развития разряда (в формировании величины разрядного напряжения). Поэтому использование ESDD может привести к ошибочной оценке опасности загрязнения и к неправильному сопоставлению разрядных напряжений изоляторов различного типа , в том числе некерамических и традиционных.

Впервые за рубежом (в отличие от России) только в последнее время обращено серьезное внимание на удельную поверхностную проводимость , как на степень загрязнения полимерных изоляторов / 14 , 54 /. Показано , что этот параметр лучше коррелирует с разрядным напряжением полимерных изоляторов , чем ESDD / 13 /. В настоящее время по рассматриваемому вопросу ведутся в двух рабочих группах IEEE и в рабочей группе 33. 04 СИГРЭ. Можно ожидать , что в качестве общепризнанного критерия для оценки степени загрязнения некерамических изоляторов будет принята удельная поверхностная проводимость слоя их искусственного равномерного загрязнения и слоя загрязнения в естественных условиях.

20. Гидрофобные свойства поверхности полимерных изоляторов и их значение.

В предыдущих разделах обзора уже неоднократно рассматривались вопросы , связанные с гидрофобностью поверхности как новых , так и состаренных (в условиях эксплуатации или искусственно) полимерных изоляторов. Ввиду исключительной

важности этого вопроса и в связи с большим количеством результатов исследований гидрофобности полимерных изоляторов , опубликованных в самое последнее время целесообразно рассмотреть эту проблему подробнее.

Хорошая работа полимерных изоляторов в условиях загрязнения по сравнению с фарфоровыми и стеклянными изоляторами по мнению многих исследователей , в значительной мере связана с поверхностной гидрофобностью материала оболочки. Среди наиболее серьезных исследований в этом направлении можно отметить работы /10,23,29,56,68-74,77,81,90/. Во всех исследованиях подчеркивается , что поверхностной гидрофобностью обладают в той или иной степени почти все известные полимерные изоляционные материалы , однако отличительной особенностью только кремнийорганических оболочек является длительное сохранение гидрофобности даже при сильном загрязнении , а в экстремальных случаях при загрязнении и увлажнении потеря гидрофобности у силиконов наблюдается только временно.

Перенос гидрофобности в слой загрязнения и восстановление гидрофобности являются уникальными характеристиками кремний-органических эластомеров. Именно эта характеристика обеспечивает их лучшую работу в условиях сильных загрязнений по сравнению с другими полимерными изоляторами. Эти свойства силикона обусловлены наличием в его объеме подвижного полимера с низким молекулярным весом (полидиметилсилоксана) и способностью этого компонента мигрировать к поверхности изолятора. Анализ гидрофобных свойств поверхности композитных изоляторов зарубежные исследователи проводят как на новых изоляторах , так и после их искусственного старения в испытательных камерах или после старения в естественных условиях на действующих электроустановках или на испытательных стендах. Некоторые результаты таких исследований уже приводились в разделах 9 , 11 и 13 настоящего обзора. Применяется множество методов определения гидрофобности , наряду с широко применяемой во всем мире методикой STRI / 23 / , применяются и такие прямые методы , как измерение угла смачиваемости и использование электронной сканирующей микроскопии.

Все исследователи пришли к выводу , что , если после естественного или искусственного старения количество низкомолекулярного компонента в общем объеме полимерного материала заметно уменьшается , то это может привести к снижению гидрофобности поверхности изолятора и к ухудшению его эксплуатационных характеристик. У многих полимерных материалов после лабораторного извлечения из них низкомолекулярного компонента наблюдалось значительное ухудшение способности восстанавливать гидрофобность / 70 /. Поэтому измерение количества и характеристик полимерных составляющих с низким молекулярным весом , извлекаемых обычно стандартными методами экстракции , после испытаний на старение является эффективным показателем работоспособности и остаточного ресурса (срока службы) полимерного изолятора.

В / 56 / исследовались состаренные кремнийорганические изоляторы , демонтированные после 7 - 10 и более лет эксплуатации на ВЛ 138 - 765 кВ (в том числе + 500 кВ постоянного тока) и испытательных стендах , расположенных в различных районах США с сильными промышленными и морскими загрязнениями (визуально изоляторы были загрязнены очень сильно). Удельная длина пути утечки демонтированных изоляторов составляла от 1,1 до 3,5 см / кВ. На всех изоляторах (даже с плотным равномерным черного цвета слоем загрязнения с высокой адгезией к поверхности силикона) угол смачивания составлял более 90 , т.е. изоляторы были полностью гидрофобными. Стандартные механические и электрические характеристики изоляторов после 7 - 10 (и более) лет эксплуатации не изменились по сравнению с такими же характеристиками у новых изоляторов. Содержание низкомолекулярных компонентов в / 56 / определялось стандартным методом экстракции Сокслета (в гексане) , затем химический состав экстрактов определялся при помощи инфракрасной спектроскопии. Для оценки степени восстановления гидрофобности поверхности состаренные в эксплуатации изоляторы предварительно обрабатывались в течение 2 - 4 минут коронным разрядом по методике / 70 / для перехода от гидрофобности к гидрофильности. Скорость восстановления гидрофобности определялась мониторингом угла смачивания в функции от времени после обработки коронным разрядом.

В результате исследований /56 / выявлено , что кремний - органические оболочки , подвергнутые естественному старению, содержат такое же количество низкомолекулярного компонента (экстрактов полидиметилсилоксана) , что и новые материалы (около 1%). В слое загрязнения на демонтированных изоляторах , имевшего существенно различный химический состав , количество полидиметилсилоксана составляло не менее 10 % от веса загрязняющего вещества.

Для сравнительной оценки проникновения низкомолекулярных компонентов не только на поверхность полимерной оболочки , но и непосредственно в слой загрязнения в / 56 / новые и состаренные в эксплуатации кремнийорганические изоляторы сначала очищались от слоя естественного загрязнения , а затем искусственно загрязнялись различными веществами , не содержащими силикона , с воспроизведением по возможности естественного слоя загрязнения по толщине (0,013 - 0,025 мм) , равномерности и адгезии к кремний - органической оболочке. Искусственное загрязнение в разные периоды времени удалялось с отдельных участков поверхности для оценки содержания в нём силикона и контроля скорости миграции полимера в слой загрязнения. Выявлено , что эта скорость одинакова для силикона до и после старения. При 60 С миграция прекращалась за 24 - 36 час. , при 20 С - за 2 - 3 дня. Эти данные косвенно согласуются с результатами , полученными в / 71 / , где показано , что требуется 3 - 4 дня после искусственного загрязнения кремнийорганических изоляторов , чтобы напряжение их перекрытия соответствовало равновесному состоянию , наблюдаемому в эксплуатации.

Таким образом утрата гидрофобности при определенных условиях (воздействие короны , разрядов на подсушенной зоне и т.д.) для кремнийорганической резины

является временной и после окончания испытательных или эксплуатационных воздействий её гидрофобность полностью восстанавливается. После старения силиконы восстанавливают свою гидрофобность практически с той же скоростью, что и новый материал (до углов смачивания более 95°), на что затрачивается не менее 24 часов /56, 70/. Поэтому срок службы кремнийорганических изоляторов с точки зрения поддержания гидрофобности их поверхности можно считать практически неограниченным.

21.Рекомендации по усовершенствованию национальных стандартов и методов испытаний полимерных изоляторов с учётом требований МЭК.

21.1. Введение

В настоящее время в России имеются следующие нормативно-методические документы по методам испытаний и нормативным требованиям к подвесным композитным (полимерным) изоляторам :

- стандарт б. СССР - ГОСТ 28856 - 90 /48/ распространяется только на серийно выпускаемые изоляторы) ;
- разработанный НИИПТ совместно с ВЭИ проект "Нормы и методы" /76/ (распространяется на опытные образцы и серийно выпускаемые изоляторы) ;
- типовая методика приемочных (ПМ) испытаний / 77/ распространяется только на опытные образцы) ;
- стандарт МЭК 1109 / 1 / распространяется на опытные образцы и серийно выпускаемые изоляторы).

В связи с необходимостью упорядочения системы нормативных документов по подвесным композитным изоляторам, приведения их в соответствие с накопленными в последние годы новыми данными, сближения требований отечественных и международных норм и методик в настоящее время в России проводится разработка комплекса документов, регламентирующих требования к подвесным композитным изоляторам, в том числе относящихся к их опытной эксплуатации.

Ниже проводится сопоставление основных требований указанных выше документов и, в первую очередь, сравнение требований стандарта МЭК и отечественных нормативов и методик.

21.2. Классификация испытаний.

Стандарт МЭК устанавливает 4 вида испытаний изоляторов :

- испытания конструкции ;
- типовые испытания ;
- выборочные испытания ;
- сплошной контроль.

ГОСТ 28856 устанавливает 3 вида испытаний изоляторов :

- приёмо - сдаточные ;
- периодические ;
- типовые.

“ Нормы и методы “ устанавливают 4 вида испытаний изоляторов :

- приёмочные ;
- приёмо - сдаточные ;
- периодические ;
- типовые.

Приёмочные испытания по / 76,77 / по своему назначению близки к “ испытаниям конструкции “ по / 1 / и при этом имеют некоторые преимущества :

а) Приёмочные испытания проводятся на опытных образцах (в от дельных оговоренных случаях на макетах) , полностью идентичных изоляторам , намеченным для серийного производства. “ Испытания конструкции “ , как указано в / 1 / проводятся для проверки пригодности разработки , материалов и способа изготовления изоляторов. Результаты “ испытаний конструкции “ считаются действительными не только для испытываемых изоляторов (макетов) , но и для целого класса изоляторов , имеющих по сравнению с испытанными изоляторами :

- такой же материал сердечника и юбок и такой же способ их изготовления
- такой же материал и конструкцию оконцевателей и такой же способ соединения ;
- такую же или большую толщину слоя материала юбки на сердечнике (включая покрытие , если оно использовано) ;
- * такое же или меньшее отношение наибольшего напряжения к длине изоляции ;

- * такое же или меньшее отношение всех механических нагрузок к наименьшему диаметру сердечника между оконцевателями ;
- * такой же или больший диаметр сердечника (в случаях , отмеченных звёздочкой , отклонения в 15 % не требуют повторения испытаний конструкции.)

Поэтому “ испытания конструкции “ скорее соответствуют применяемым в отечественной практике предварительным испытаниям , когда решается вопрос о принципиальной пригодности того или иного нового конструктивного решения. Можно полагать , что “ испытания конструкции “ предполагают высокий и стабильный уровень производства, гарантирующий обеспечение на серийно выпускаемых изоляторах тех характеристик , которые выявлены на макетах или изоляторах , аналогичных серийным (по материалу , конструкции и внешней конфигурации) , на стадии предварительных испытаний. Очевидно , что для современных условий производства композитных изоляторов в России такой подход нельзя признать приемлемым.

Отметим , что в России в соответствии с / 76/ приёмочные испытания по полной программе необходимо производить даже при освоении в новых условиях производства уже принятых ранее изоляторов , что несомненно жестче , чем правила , установленные “ испытаниями конструкции “.

б) Приемочные испытания содержат больший объём видов испытаний, чем “ испытания конструкции”. Оба сопоставляемых класса испытаний содержат следующие воздействия (приводятся в формулировках стандарта МЭК) :

- испытания напряжением промышленной частоты в сухом состоянии (в / 76/ только для классов напряжения 6 - 35 кВ) ;
- испытания резким сбросом нагрузки ;
- термомеханические испытания ;
- испытания погружением в воду ;
- испытания импульсами с крутым фронтом ;
- определение разрушающей нагрузки при растяжении ;
- испытание оболочки на трек и эрозию ;
- испытания материала стержня красителем ;
- испытания материала стержня на высоком напряжением ;
- осмотры изоляторов после испытаний.

В отечественных нормативах / 76/ в приемочные испытания включены следующие воздействия , не предусмотренные “ испытаниями конструкции “ :

- испытания в загрязненном и увлажненном состоянии при промышленной частоте ;
- испытания в загрязненном и увлажненном состоянии при коммутационных импульсах ;
- испытания на стойкость к действию силовой дуги ;
- испытания на стойкость к воспламеняемости ;
- определение гидрофобности защитной оболочки ;
- испытания по определению уровня радиопомех от изоляторов.

Вместе с тем , необходимо отметить , что в “ Испытаниях конструкции “ содержатся воздействия , не предусмотренные отечественными нормативами :

- проверка крутизны зависимости “ механическая прочность - время “ ;
- испытание на диффузию воды в стеклопластиковый стержень .

Кроме того испытания стандартным грозовым импульсом и напряжением промышленной частоты под дождем по стандарту МЭК проводятся при типовых испытаниях , а по “ Нормам и методам “ - при приемочных испытаниях. Стандартом МЭК предусмотрены испытания напряжением коммутационных импульсов под дождем (типовые испытания) , а по “ Нормам и методам “ предусмотрены испытания напряжением коммутационного импульса в сухом состоянии (для 110 - 750 кВ) при приемочных испытаниях.

Таким образом можно сделать вывод , что в целом при приемочных испытаниях в России изоляторы подвергаются большему спектру разнообразных воздействий , чем при “ испытаниях конструкции ” по стандарту МЭК. Другой возникающий при таком сопоставлении вопрос - методика и жесткость отдельных из применяемых воздействий. Соответствующее сопоставление международных и отечественных требований в этом плане производится ниже.

Важно также отметить , что при типовых испытаниях , предусмотренных отечественными нормами /76/, а тем более /48/, никаких принципиально новых воздействий по сравнению с приемочными испытаниями не предусмотрено. В международных же нормах / 1 / при типовых и выборочных испытаниях предусмотрены следующие , не рассмотренные выше воздействия :

- механическое испытание “ нагрузка - время “ ;
- проверка гальванизации.

в) Отечественные документы /48,76/ устанавливают методы испытаний, критерии приемки и нормированные значения электрических и механических характеристик композитных изоляторов, стандарт МЭК содержит только методы испытаний и критерии приемки.

г) Приемочные испытания проводятся на значительно большем числе изоляторов, чем испытания конструкции по стандарту МЭК (для приемочных испытаний по / 76 / выделяется 28 изоляторов, а для испытаний конструкции по / 1 / всего 12 изоляторов).

д) В отечественных нормативах принята иная последовательность

испытаний, проводимых на одних и тех же изоляторах, чем в между-народных нормах. Анализ показывает, что принятая в России последовательность испытаний в основном может быть сохранена, т.к. она более продумана в части жесткости воздействий и периодического контроля изменений характеристик изоляторов.

На основе изложенных соображений можно сделать вывод о том, что вводить "испытания конструкции" в отечественные нормативы нецелесообразно. Следует сохранить для вновь разрабатываемых изоляторов нормы, методы и критерии приемки при проведении приемочных испытаний с сохранением в основном принятого в / 76 / количества испытываемых изоляторов, последовательности их испытаний и с введением некоторых новых испытательных воздействий с учетом рекомендаций МЭК. Некоторые уже содержащиеся в отечественных нормативах воздействия целесообразно привести в большее соответствие с рекомендациями МЭК. Подробнее этот вопрос рассматривается ниже. Следует сохранить требование о том, что все вновь разрабатываемые или изготовленные в новых условиях изоляторы должны проходить приемочные испытания, даже в случае, если аналогичный изолятор уже успешно выдержал приемочные испытания.

Типовые испытания по стандарту МЭК проводятся для проверки некоторых характеристик композитных изоляторов, зависящих в основном от их формы и размеров. Типовым испытаниям должны подвергаться изоляторы, класс которых прошел испытания конструкции. Они должны быть проверены только в случае изменения типа или материала композитного изолятора. Достаточно близкая по существу и более подробная формулировка типовых испытаний содержится в отечественном стандарте / 48 /, где указано, что эти испытания проводят в случае изменения конструкции, типа материала или технологических процессов изготовления составных частей и сборки изоляторов для оценки влияния внесенных изменений на характеристики и качество конструкции. Однако эта формулировка требует переработки, т.к. в случае изменения конструкции и материалов изоляторов следует обязательно провести приемочные испытания по существу нового изолятора. По-видимому, более правильно в новой редакции отечественного стандарта записать, что типовые испытания в общем случае должны проводиться в объеме приемочных, однако объем типовых испытаний может быть сокращен, если внесенные в изолятор изменения заведомо не могут повлиять на те или иные характеристики серийно выпускаемого изолятора. В целом можно считать, что

область применения типовых испытаний по международному и отечественному стандарту одна и та же.

Выборочные испытания по стандарту МЭК проводятся для проверки тех характеристик композитных изоляторов, которые зависят от качества изготовления и от использованных материалов. Они проводятся на изоляторах, произвольно выбранных из партий, представленных к выпуску.

Периодические испытания, предусмотренные отечественным стандартом, по смыслу эквивалентны выборочным испытаниям по МЭК (формулировка выборочных испытаний в / 48 / не приведена, но имеется в основополагающем стандарте / 78 /).

Испытания на сплошной контроль по стандарту МЭК имеют целью не допустить выпуск композитных изоляторов с дефектами при изготовлении. Они проводятся на каждом изоляторе, представленном к выпуску. Эти испытания по назначению полностью соответствуют приемо-сдаточным испытаниям по отечественному стандарту.

Таким образом нет никаких противоречий между типовыми, выборочными и испытаниями на сплошной контроль по стандарту МЭК и типовыми, периодическими и приемо-сдаточными испытаниями композитных изоляторов по отечественному стандарту. Следует отметить, что порядок проведения и объем всех этих испытаний, приводящихся в заводских условиях на серийно выпускаемых изоляторах, в отечественном стандарте представлены в существенно более проработанном виде. Ниже отдельно будут сопоставлены воздействия при этих испытаниях в соответствии с международным и отечественным стандартами.

В целом рассмотрение всех испытаний композитных изоляторов, предусмотренных стандартом МЭК и отечественными нормативами, позволяет сделать заключение о нецелесообразности изменения принятой в России системы испытаний, в частности введения в неё "испытаний конструкции". Следует сохранить сложившуюся в России практику проведения приемочных испытаний и продолжать работать над совершенствованием программы и методики таких испытаний.

При этом надо ещё раз отметить, что стандарт МЭК / 1 / включает в себя как испытания опытных образцов, так и испытания серийно выпускаемой продукции. По такому же типу были составлены российские нормы и методы / 76 /. Другой подход практиковался в б. СССР, где действовал стандарт / 48 /, распространявшийся на серийно выпускаемые изоляторы, и документ / 77 /, регламентирующий приемочные испытания опытных образцов. Представляется, что такая практика является более правильной. Актуальной задачей в связи с этим является :

- переработка ГОСТ 28856 - 90 применительно к российским условиям (здесь существенных изменений не требуется) ;

- разработка норм и методов приемочных испытаний подвесных композитных изоляторов (здесь необходимо учесть большой объем данных, накопленных в последние годы при эксплуатации, испытаниях и исследованиях композитных изоляторов, а также рекомендации стандарта МЭК).

Большое преимущество намеченных к разработке документов, в отличие от стандарта МЭК, состоит в том, что они будут содержать не только методику, но и нормативные требования к характеристикам полимерных изоляторов разных классов напряжения, предназначенных для эксплуатации в районах с различными условиями загрязнения. Разрабатываемые нормативно-методические документы следует распространить на изоляторы 6 - 750 кВ. Эти документы должны регламентировать также проведение опытной эксплуатации, эксплуатационных и после эксплуатационных испытаний композитных изоляторов.

Перейдем теперь к сопоставлению отдельных видов испытаний по стандарту МЭК и отечественным нормативам.

21. 3. Разрядные характеристики в сухом состоянии и под дождем.

Виды электрических воздействий и нормированные значения разрядных (выдерживаемых) напряжений подвесных композитных изоляторов, а также методики соответствующих испытаний в б. СССР неоднократно обсуждались ведущими научно-исследовательскими организациями (СПГТУ, ВЭИ, НИИПТ, СибНИИЭ) и согласованная точка зрения по этим вопросам отражена в "Нормах и методах" / 76 /. Поэтому целесообразно при переработке ГОСТ 28856, а также норм и методов приемочных испытаний композитных изоляторов разрядные характеристики в сухом состоянии и под дождем (нормированные значения, методы испытаний, правила приемки) принять без изменений в соответствии с проектом / 76/, разработанным в 1994 г. НИИПТ совместно с ВЭИ. Методика испытаний, приведенная в / 76 /, в основном соответствует требованиям ГОСТ 1516.2 / 80 /. В "Нормах и методах" приведены нормированные значения 50 %-ного разрядного напряжения грозовых импульсов (6 - 750 кВ), 50 %-ного разрядного напряжения коммутационного импульса в сухом состоянии (110 - 750 кВ), выдерживаемого напряжения промышленной частоты в сухом состоянии (6 - 35 кВ), выдерживаемого напряжения промышленной частоты под дождем (6 - 750 кВ). Стандартом МЭК / 4 / предусмотрен несколько иной набор испытательных воздействий высокого напряжения, отсутствуют нормированные значения разрядных (выдерживаемых) напряжений, а испытания проводятся по методике стандарта МЭК 383 / 79/. В отличие от МЭК в / 76 / более подробно описаны правила приемки композитных изоляторов после определения их разрядных характеристик и эти правила следует сохранить в разрабатываемых документах. Изоляторы считают выдержавшими

испытания , если разрядные характеристики не ниже нормированных и при этом не произошло существенных повреждений поверхности изоляторов.

21. 4. Разрядные характеристики в загрязненном и увлажненном состоянии.

Стандартом МЭК 1109 испытания композитных изоляторов в загрязненном и увлажненном состоянии не предусмотрены. В преамбуле этого стандарта испытания при загрязнении названы “ в целом нецелесообразными “ , т.к. при эксплуатации в условиях загрязнения композитные изоляторы имеют очень высокие разрядные напряжения. Такая позиция МЭК связана с тем , что рассматриваемый стандарт разрабатывался в начале 80 -х годов / 30 / , когда прогноз поведения полимерных изоляторов в условиях загрязнения был необоснованно оптимистическим. В настоящее время в МЭК точка зрения на поведение композитных изоляторов в условиях загрязнения и увлажнения их поверхности существенно изменилась , создано несколько рабочих групп МЭК , СИГРЭ и IEEE по разработке методики испытаний полимерных изоляторов в условиях загрязнения и определению критерия , характеризующего степень загрязнения этих изоляторов.

В б. СССР и России исследования разрядных напряжений полимерных изоляторов при их искусственном и естественном загрязнении были заблаговременно начаты около 20 лет назад (ЛПИ , НИИПТ , СКТБ, СибНИИЭ , ВЭИ и др.) , в результате проведенных исследований достигнута общая точка зрения по рассматриваемому вопросу , отраженная в ГОСТ 28856 и “ Нормам и методах “ / 48,76 / , где приведены не только методики соответствующих испытаний , но и нормированные испытательные степени загрязнения , нормированные значения разрядных (выдерживаемых) напряжений , а также правила приемки изоляторов после этих испытаний. Поэтому при разработке новых документов по подвесным полимерным изоляторам целесообразно в основном принять требования к их разрядным напряжениям при искусственном загрязнении и увлажнении , соответствующие проекту / 76 /. Вместе с тем необходимо отметить , что включенная в / 76 / методика испытаний при искусственном загрязнении , в основном базирующаяся на стандарте /85/, распространяющемся на керамические и стеклянные изоляторы , применительно к композитным изоляторам требует серьезной доработки. Соответствующие предложения подготовлены НИИПТ и будут предложены для новой редакции документов по методам испытаний подвесных композитных изоляторов.

В процессе разработки следует обсудить следующие вопросы:

- целесообразность нормирования районов работы изоляторов по семи СЗА , как принято в /48,76 / , или по четырем степеням загрязненности атмосферы , как принято в / 9 , 81 / ;

- целесообразность сохранения включенных в / 76 / и не имеющих в / 48 / требований к нормированным выдерживаемым напряжениям коммутационных импульсов при искусственном загрязнении.

В разрабатываемых документах целесообразно сохранить требование / 76 / о том , что изоляторы считают выдержавшими испытания, если их разрядные (выдерживаемые) напряжения при заданной испытательной поверхностной проводимости не ниже нормированных значений и при этом не отмечено существенных повреждений поверхности изоляторов.

21.5. Термомеханические испытания.

По /48 , 76 / термомеханические испытания проводятся в основном в соответствии со стандартом МЭК / 1 / при несколько большей величине приложенной растягивающей нагрузки и большей минусовой температуре. В разрабатываемых документах целесообразно сохранить редакцию / 76 / с добавлением , в качестве рекомендательной процедуры , контроля длины изоляторов до и после термомеханических испытаний , как это предусмотрено / 1 /. Повидимому , в соответствии со стандартом МЭК целесообразно также увеличить до 6 - 8 часов время воздействия крайних уровней температуры и привести график проведения испытаний , аналогичный включенному в / 1 /. Следует переработать последовательность испытаний , предусмотренную / 48, 76 / и в соответствии с рекомендациями / 48 / проводить на одних и тех же изоляторах последовательно термомеханические испытания , испытания на кипячение (" погружением в воду ") и на резкий сброс нагрузки , которые в / 76 / проводятся на различных образцах. В качестве контрольных испытаний кроме воздействия импульсов напряжения с крутым фронтом целесообразно добавить , как рекомендовано в / 1 / , приложение в течение 30 минут напряжения промышленной частоты , по величине близкого к сухоразрядному напряжению изоляторов.

В качестве критерия приемки целесообразно сохранить требование / 76 / о том , что изоляторы можно считать выдержавшими термомеханические испытания , если нормированная разрушающая сила достигнута без механического разрушения , не произошло смещения или деформации оконцевателей , смещения ребер , не обнаружены трещины на оконцевателях и изоляционной части , и если после испытаний импульсами с крутым фронтом и напряжением промышленной частоты не появились существенные повреждения - трещины , местная эрозия , науглероженные побеги общей длиной более 10 см , и не произошло пробоя изолятора.

21.6. Испытания погружением в воду.

Приведенная в / 76, 77/ методика испытания на проникновение влаги (“ на кипячение “) заметно отличается от испытаний погружением в воду по МЭК. Отечественные испытания проводятся попеременным погружением изоляторов (или макетов) в горячую (100 С) и холодную (20 С) воду , приведен рекомендуемый график нахождения изоляторов в горячей и холодной воде с общей продолжительностью 48 часов.

При разработке новых документов по испытаниям композитных изоляторов целесообразно принять полностью соответствующую МЭК методику , а именно выдерживать изоляторы (макеты) в течение 42 часов в ёмкости с кипящей деионизованной водой , к которой добавлено 0,1 % по весу NaCl . После кипячения образцы должны оставаться в ёмкости до охлаждения воды примерно до 50 С и выдерживаться при этой температуре до начала контрольных испытаний.

Последовательность проведения испытаний , контрольные испытания и правила приемки целесообразно принять в соответствии с рекомендациями п. 5 настоящей работы (термомеханические испытания).

21.7. Испытания резким сбросом нагрузки.

Эти испытания включены в / 76 ,77 / и стандарт МЭК / 1 / . По МЭК испытания изоляторов или макетов проводятся при температуре от - 20 С до - 25 С при одновременном приложении растягивающей нагрузки (30 % от нормированной разрушающей). В / 76 ,77 / нормировано приложение к изоляторам (макетам) в течение 5 мин при температуре около 0 С такой же нагрузки и сброса её за время не более 1 с. Там же приведены заимствованные из / 1 / примеры возможных устройств для резкого сброса нагрузки.

В разрабатываемые документы по композитным изоляторам целесообразно включить испытания по сбросу нагрузки в целом в редакции / 76 / , где указан (в отличие от стандарта МЭК) критерий приемки - изоляторы считаются выдержавшими испытания , если после трех циклов приложения и сброса нагрузки на каждом из трех испытуемом изоляторе (по МЭК по одному циклу на каждом из 3 - х испытуемых изоляторов) отсутствуют трещины на теле изолятора и сколы ребер. Вместе с тем при разработке рассматриваемых документов целесообразно рассмотреть следующие вопросы :

- возможность нормирования испытаний при низких температурах в соответствии с требованиями МЭК (это потребует применения морозильных устройств) ;

- необходимость (как указывалось уже в п.п. 5 , 6) проведения последовательно на одних и тех же изоляторах термомеханических испытаний , испытаний на проникновение влаги и испытаний на сброс нагрузки ; по / 76 / эти испытания проводятся на разных изоляторах.

21.8 Испытания на дугостойкость.

Такие испытания в стандарт МЭК 1109 не включены “ как нецелесообразные “. Повидимому , здесь отразилась излишне оптимистичная оценка композитных изоляторов , т.к. , по мнению МЭК , опыт эксплуатации и проведенные испытания не дают оснований опасаться неблагоприятного воздействия силовой дуги на работоспособность композитных изоляторов. В преамбуле стандарта МЭК справедливо указано , что трудно нормировать проведение соответствующих испытаний , т.к. параметры силовой дуги разнообразны и могут иметь весьма различные значения в зависимости от конфигурации сети и конструкции устройств защиты от перенапряжений. Стандарт МЭК 1109 рекомендует решать проблему защиты от силовой дуги путем правильного выбора дугозащитных устройств. Вместе с тем этот стандарт не исключает возможности испытаний на дугостойкость по согласованию между эксплуатационниками и изготовителями. В преамбуле стандарта МЭК указано также , что в настоящее время стандартная методика дуговых испытаний находится на рассмотрении в подкомитете 36 В.

В противоположность позиции МЭК в б. СССР и России испытаниям на дугостойкость композитных изоляторов с самого начала уделялось серьезное внимание , был разработан специальный методический документ / 82 / , использовавшийся при приемочных испытаниях подвесных композитных изоляторов. С некоторыми коррективами методика / 82 / включена в “ Нормы и методы “ / 76 / с учетом опыта ВЭИ , в особенности в части испытаний воздействием силовой дуги на изоляторы 6 - 35 кВ.

При разработке новых документов по испытаниям композитных изоляторов целесообразно включить в них методы испытаний и критерии приемки при воздействии силовой дуги в соответствии с / 76 /. Изоляторы можно считать выдержавшими испытания , если при воздействии электрической силовой дуги с заданными параметрами не произошло возгорания защитной оболочки или других существенных повреждений и получены положительные результаты контрольных испытаний (выдерживаемым 30 мин. напряжением промышленной частоты , близким по величине к сухоразрядному напряжению изоляторов , одноминутной растягивающей силой , составляющей 0,7 нормированной механической силы).

Заслуживает серьезного внимания вопрос о стойкости композитных изоляторов на напряжения 6 - 35 кВ к действию ёмкостной дуги тока однофазного замыкания на землю с

параметрами , характерными для сетей с изолированной или компенсированной нейтралью. Целесообразность нормирования соответствующих требований будет выявлена после окончания экспериментальной проверки стойкости композитных изоляторов к действию ёмкостных дуг, , ведущейся в настоящее время в НИИПТ.

21.9. Испытания импульсами напряжения с крутым фронтом.

Эти испытания во всех существующих документах / 1,48,76,78 / рассматриваются как контрольные. Методика соответствующих испытаний по / 76 / полностью совпадает со стандартом МЭК , но расписана более тщательно. В стандарте МЭК указана крутизна импульса не менее 1000 кВ/мкс , по / 46,76,78 / - не менее 2000 кВ/мкс . По стандарту МЭК контрольные испытания импульсами с крутым фронтом проводятся после цикла воздействий :

- резкий сброс нагрузки ;
- термомеханические испытания ;
- испытания погружением в кипящую воду.

По / 76 / испытания импульсами напряжения с крутым фронтом должны проводиться также и после испытаний на трекинго-эрозинную стойкость.

При разработке новых документов по подвесным композитным изоляторам целесообразно сохранить методику контрольных испытаний импульсами напряжения с крутым фронтом , приведенную в / 76 / , а также сохранить проведение рассматриваемых испытаний после испытаний на трекингостойкость , если испытания на трекингостойкость будут проводиться по методике / 76 / . Следует сохранить также приведенное в / 76 / требование о том , что изоляторы можно считать выдержавшими испытания импульсами напряжения с крутым фронтом , если не произошло существенного повреждения их поверхности или пробоя по границе раздела защитного покрытия и стеклопластикового стержня.

21.10. Испытания изоляторов на определение зависимости механической прочности от времени.

В новую редакцию российских норм и методов приемочных испытаний подвесных композитных изоляторов целесообразно включить в соответствии с рекомендациями МЭК

(п.п. 5.2. , 6.4. МЭК 1109) испытания на определение зависимости механической прочности на растяжение от времени , т.е. прогнозирование возможного снижения механической прочности изоляторов в течение длительной эксплуатации.

По п. 5.2. МЭК (испытания конструкции) механические испытания должны проводиться на шести изоляторах или макетах. При этом на трех изоляторах предварительно определяется среднее значение разрушающей силы при растяжении , а к трем остальным изоляторам в течение 96 часов должна прикладываться растягивающаяся сила , составляющая 60 % от ранее полученной средней разрушающей нагрузки. Изоляторы должны выдерживать эту нагрузку без повреждений.

По п. 6.4. МЭК 1109 (типовые испытания) к трем изоляторам в течение 96 часов должно прикладываться 70 % от нормированной разрушающей механической силы на растяжение , а после указанной выдержки нагрузка по определенной процедуре примерно за 1,5 мин должна быть поднята до нормированного значения разрушающей силы (испытания эквивалентны одноминутному испытанию нормированной силой). Изоляторы считают выдержавшими испытания , если ни во время 96 - часовых испытаний , ни во время приложения нормированной разрушающей силы не произошло какого-либо механического отказа (поломки или разрыва стержня или арматуры).

Представляется целесообразным включить оба этих испытания , как дополняющие друг друга , в разрабатываемые нормы и методы приемочных испытаний изоляторов. Кроме того целесообразно рекомендовать изготовителям изоляторов проводить экспериментальное определение зависимости “ разрушающая механическая сила при растяжении - время “ при длительностях воздействия не менее 5000 час и предъявлять результаты соответствующих испытаний при приемке изоляторов. Эти данные крайне важны для оценки механического старения изоляторов в эксплуатации (разрыв стержня , сползание оконцевателей).

21.11. Испытания на трек и эрозию (на трекингоэрозионную стойкость).

Эти испытания по стандарту МЭК и по отечественным нормативам проводятся по существенно различным методикам. Важно отметить , что отечественные нормативы /48,76,83,84/ были разработаны после длительных дискуссий с участием ведущих научно - исследовательских организаций (СибНИИЭ , СПГТУ , СКТБ по изоляторам и арматуре , НИИПТ). Они основаны на оригинальной методике и отражают российскую специфику в части накопленного опыта соответствующих испытаний и наличия необходимых испытательных устройств.

При подготовке новых документов по методам испытаний композитных изоляторов вопрос о методике испытаний на трекинг - эрозионную стойкость требует специального подробного рассмотрения с участием заинтересованных организаций. Прежде чем предложить для дискуссии варианты нормирования, рассмотрим основные положения стандарта МЭК по рассматриваемому вопросу :

- испытания проводятся на изоляторах (макетах) с удельной длиной пути утечки 2 см/кВ (длина пути утечки 484 - 693 мм , длительно приложенное напряжение 14 - 20 кВ) , т.е. испытания изоляторов 110 кВ и выше в натуральную величину стандартом МЭК не предусматриваются ;
- испытания проводятся в специальной камере с объёмом не более 10 м³ ;
- испытываются два образца (один в горизонтальном , другой в вертикальном положении) ;
- длительность испытаний - 1000 час. ;
- содержание NaCl в распыляемой воде (тумане)-(10 + 0,5)кг/м³.

Подробно регламентированы и другие отдельные аспекты методики испытаний , кардинально отличающейся от российской методики испытаний на стойкость к треку и эрозии. При испытаниях по методике МЭК изоляторы считают выдержавшими испытания , если в течение испытаний на каждом испытанном изоляторе не более 3-х раз наблюдается ток утечки 1 А и более , если не произошло трекинга , если эрозия не достигла стеклопластикового стержня и если не было разрушения юбок изолятора. Стержень после испытаний не должен обнажаться. В стандарте МЭК 1109 указано , что в настоящее время отсутствуют надежные критерии , количественно характеризующие допустимое количество эрозионных трещин на защитной оболочке.

Представляется целесообразным при разработке новых документов по испытаниям подвесных композитных изоляторов :

- временно (со сроком действия 2 - 3 года) сохранить действующую в России методику испытаний на трекингэрозионную стойкость / 48,76,83,84 / с применением NaCl (предпочтительный метод испытаний для - III С3А) и CaCl₂ (предпочтительный метод испытаний для IV-VII С3А) , при этом методику испытаний принять в основном в редакции / 76 / ;
- дополнить эту методику предварительными испытаниями на климатическое старение с целью предварительной подготовки поверхности изоляторов перед испытаниями на трекингэрозионную стойкость ; подготовительные испытания должны проводиться путем циклического приложения к изоляторам различных нагрузок ; методика предварительных испытаний в настоящее время разрабатывается в НИИПТ ;

- сохранить требование / 76 / , что изоляторы можно считать выдержавшими испытания на трекингоэрозионную стойкость , если не произошло их пробоя и на поверхности защитной оболочки не обнаружено критических повреждений ; кроме того изоляторы должны успешно выдержать контрольные испытания импульсами с крутым фронтом (следует сохранить приведенное в / 76 / определение малосущественных, существенных и критических повреждений защитной оболочки и пробоя изолятора) ;
- в качестве альтернативной рекомендательной методики целесообразно включить в разрабатываемые документы испытания на трек и эрозию по стандарту МЭК с длительностью испытания 1000 час с тем , чтобы после приобретения оборудования и накопления опыта соответствующих испытаний эта методика как полноправная и единая была включена в последующие редакции отечественных нормативов ;
- предложенная в стандарте МЭК для тяжелых условий (интенсивное солнечное облучение , частые колебания температур , очень сильные загрязнения) методика испытаний на трек и эрозию длительностью 5000 час для условий России представляется неприемлемой для нормирования и может быть использована только для исследовательских целей.

21.12. Ускоренные испытания на климатическое и электрическое старение изоляторов.

Такие испытания интенсивно ведутся во всем мире и признаются чрезвычайно актуальными для прогнозирования срока службы полимерных изоляторов. В стандарте МЭК 1109 эти испытания не предусмотрены , имеется только указание о целесообразности проведения испытаний , состоящих из многоциклового приложения различных нагрузок , моделирующих атмосферные условия при длительном воздействии наибольшего рабочего напряжения. В приложении С к стандарту МЭК 1109 приведен пример суточного цикла ускоренных испытаний , содержащего периоды увлажнения , нагрева до 50 С , смачивания деминерализованным дождем , воздействия соленого тумана 7 кг/ м³ и ультрафиолетового облучения. В связи с неподготовленностью российских лабораторий испытания на ускоренное старение в настоящее время не могут быть включены в подлежащие разработке документы по подвесным композитным изоляторам. Однако ввиду исключительной важности рассматриваемых испытаний целесообразно по мере возможности обеспечить ведущие лаборатории соответствующим оборудованием и приступить к освоению испытаний на ускоренное климатическое и электрическое старение по методике , наилучшим образом отражающей условия эксплуатации композитных изоляторов в России.

21.13. Испытания стеклопластикового

стержня

В стандарте МЭК 1109 предусмотрено два вида испытаний стеклопластикового стержня (в разделе “ Испытания конструкции “) :

- испытание красителем ;
- испытание на диффузию воды.

Испытания красителем (“ испытание на проникновение красящей жидкости “) включены в / 76 /. Следует сохранить эти испытания в разрабатываемых документах на испытание композитных изоляторов в редакции / 76 /. При этом время , необходимое для проникновения красителя (фуксина) в стандартные образцы стеклопластикового стержня должно быть не менее 15 мин.

Испытание на диффузию воды следует включить в разрабатываемые документы в редакции стандарта МЭК / 1 /. При этом вторая стадия этих испытаний-испытание под напряжением по/1/ предусматривает приложение напряжения 12 кВ в течение 1 минуты к стандартным образцам стеклопластикового стержня после подготовки и кипячения по специальной методике. Во время испытаний не должны иметь место пробой или перекрытие по поверхности , а ток утечки не должен превышать 1 мА.

Целесообразно дополнить эти испытания по стандарту МЭК предусмотренным в отечественных рекомендациях / 76/ определением электрической прочности стандартных образцов стеклопластикового стержня по методике ГОСТ 6433-3. Изоляторы при этом следует считать выдержавшими испытания , если электрическая прочность стеклопластикового стержня будет не менее величины , указанной в научно-технической документации на изолятор конкретного типа.

21.14. Определение гидрофобности защитной оболочки.

Несмотря на то , что во всех странах уделяется очень большое внимание исследованиям , связанным с оценкой гидрофобности поверхности защитной оболочки композитных изоляторов , стандарт МЭК 1109 требований к гидрофобности поверхности не предъявляет. В нормативах / 76 / приведена методика определения угла смачивания , однако этот подход нельзя считать вполне соответствующим современным требованиям. При разработке новых документов по методам испытаний композитных изоляторов следует ориентироваться на разработанную НИИПТ классификацию гидрофобности , в основе которой лежит методика , предложенная шведскими исследователями.

21.15. Прочие испытания.

Методика испытаний механической растягивающей силой в /48,76 / не отличается от принятой в стандарте МЭК. Целесообразно сохранить её в редакции / 76 /, указав в соответствии с / 76 /, что изоляторы считают выдержавшими испытания, если нормированная механическая разрушающая или одноминутная растягивающая силы достигнута без разрушения изоляторов и при этом не произошло смещения или деформации оконцевателей, смещения ребер, не обнаружены трещины на оконцевателях и изоляционной части.

Методику испытаний по определению уровня радиопомех рекомендуется сохранить в редакции / 76 / : уровень радиопомех при наибольшем рабочем фазном напряжении не должен быть выше 60 ДБ при отсутствии видимой короны на арматуре изоляторов. Отметим, что стандарт МЭК 1109 не содержит испытаний на радиопомехи, а дает лишь ссылку на рекомендацию МЭК 437.

Испытания на невоспламеняемость рекомендуется сохранить в редакции / 2 /, предложенной ВЭИ. В стандарте МЭК 1109 указано, что приемлемой методики испытаний на невоспламеняемость ещё не разработано.

Испытания выдерживаемым напряжением промышленной частоты в течение 30 мин, испытания на гальванизацию и определение качества поверхности изоляторов следует сохранить в редакции / 76 /.

Общие положения правил приемки композитных изоляторов (размер партий, проведение повторных испытаний и т.д.) в разрабатываемых документах следует сохранить по / 48,76 /.

21.16. Направления дальнейших разработок.

При дальнейшей разработке методов испытаний композитных изоляторов необходимо (в соответствии с указаниями стандарта МЭК 1109) уделить внимание следующим вопросам :

- методам испытаний, воспроизводящих хрупкий излом стеклопластикового стержня ;
- методам испытаний на длительное механическое старение изоляторов, в том числе прогнозирующих возможное сползание оконцевателей ;

- приемлемым по трудоёмкости и достоверности методам испытаний на электрическое и механическое старение ;
- методам испытаний поверхностей раздела в композитных изоляторах;
- методам испытаний на кручение и стойкость к действию динамических нагрузок (растяжение , изгиб , кручение , сжатие).

Список литературных источников

1. IEC 1109 (1992 г.). Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V. Definitions , test methods and acceptance criteria.
2. Cherney E.A. Non-ceramic insulators - a simple design that requires careful analysis. IEEE Electrical Insulation Magazine , 1996 , v.12 № 3 , 7 - 12.
3. Worldwide service experience with HV composite insulators. Subworking group 03.01. of Study Committee 22. Electra , 1990 , № 130 , 68-77.
4. Service performance of composite insulators used on HVDC lines Working Group 03 Study Committee 22. Electra , 1995 , № 161 , 53-57.
5. Гутман И.Ю. , Соломоник Е.А. , Тиходеев Н.Н. Полимерные изоляторы для воздушных линий электропередачи. Энергохозяйство за рубежом , 1982 , № 4 , 21 - 25.
6. Гутман И.Ю. , Соломоник Е.А. Усовершенствование конструкции и опыт эксплуатации полимерных изоляторов. Энергохозяйство за рубежом , 1987 , № 4 , 15 - 20.
7. Гутман И.Ю. Опыт эксплуатации за рубежом полимерных изоляторов для воздушных линий электропередачи. Энергохозяйство за рубежом , 1991 , № 5 , 21 - 23.
8. Гутман И.Ю. , Кравченко В.А. , Соломоник Е.А. Исследования и опыт эксплуатации подвесных полимерных изоляторов. Электрические станции , 1995 , № 12 , 56 - 64.
9. IEC 815 (1986 г.). Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions.
10. Vlastos A.E. Transmission line polymeric insulators leakage currents and performance. CIGRE 1992 , Pap. 15 - 401.

11. Marrone Cr. , Nicolini P. , Motori A. , Sandrolini E. Laboratory measuring techniques applied to check insulating materials and interfaces in composite insulators. CIGRE 1992 , Pap. 15 - 402.
12. Krylov S.V. Diagnostigs of polymer insulators ageing based on their deformation characteristics under load. CIGRE 1992 , Pap. 22 - 301.
13. Gorur R.S. , Bernstein B.S. , Hervig H. , Champion T. , Orbeck T. Evaluation of polimeric materials for HV outdoor insulation. CIGRE 1994, Pap. 15 - 07.
14. Karady G.G. , Schneider H.M. , Risk F.A.M. Review of CIGRE and IEEE research into pollution performance of nonceramic insulators:field aging effects and laboratory test techniques. CIGRE 1994 , Pap. 33-103.
15. Bossi S. , PIGINI A. , Reali R. , Fini G.P. , Porrino A. a.o. Study of the performance of composite insulators in polluted conditions. CIGRE 1994 ,Pap. 33 - 104.
16. Naito K. , Izumi K. , Takasu K. , Matsuoka R. Performance of composite insulators under polluted conditions. CIGRE 1996 , Pap.33-301.
17. Kindersberger J. , Schutz A. , Karner H.C. , Huir R.V.D. Serviceperformance , material design and applications of composite insulators withsilicone rubber housings. CIGRE 1996 , Pap. 33 - 303.
18. Riguel G. , Fourmiqué J.M. , Decker D.De. , Joulie R. , Parrand R. Studies of the long term performance of composite insulators and of the representativity of ageing tests. CIGRE 1996 , Pap. 33 - 304.
19. Marrone G. , Marinoni F. New apparatus set up at ENEL to monitor pollution deposit and pilot cleaning operations on outdoor insulators. CIGRE 1996 , Pap. 33 - 302.
20. Vlastos A.E. , Sorqvist T. Field experience of ageing and performanceof polymeric composite insulators. CIGRE 1996.
21. Weck K.-H. Obervoltages and insulation co-ordination , Electra,1995 , № 158 , 71 - 73.
22. Тиходеев Н.Н. Отчет о работе исследовательского комитета 33 СИГРЭ “ Координация изоляции в электрических сетях “ в 1995 -1996 гг. , Л. , 1996 , 22 с.
23. Hydrophobicity classification guide. STRI , Guide 1 , 92 / 1.
24. Cookson A.H. Insulating materials. Electra , 1995 , № 158 , 41 - 42.
25. Kawamura T. a.o. Development of metaloxide transmission line arrester and its effectiveness. CIGRE 1994 , Pap. 33 - 201.

26. Stenstrom L. , Lundquist J. New polymerhoused ZnO surge arrester for high energy applications. CIGRE 1994 , Pap. 33 - 202.
27. Hinrichsen V. , Fien H. , Solbach H.-B. , Priebe J. Metalloxidesurge arresters with composite hollow insulators for high-voltage systems. CIGRE 1994 , Pap. 33 - 203.
28. INMR Interviews Prof. Hermann Karner , Insulator News and Market Report , 1995 , № 3 (May - June) , 12 - 17.
29. Vlastos A.E. Diagnosis of the shed surface degradation on composite polymeric insulators long term exposed to outdoor environment. CIGRE 1990 , Pap. 15 / 33 - 05.
30. CIGRE Study Committee 22 , W.G. 10 , 1983. Technical basis for nominal requirements for composite insulators. Electra , № 88 , 1983 , 89-114.
31. Guide for the identification of brittle fracture of composite insulator FPR rod. Working Group 03 of CIGRE Study Committee 22. Electra , 1992 , № 143 , 61 - 65.
32. Use of stress control rings on composite insulators . Working Group 03 of CIGRE Study Committee 22. Electra , 1992 , №143 , 69 - 71.
33. IEC 36 / 118 / CD (1995 г.). Composite insulators. Hollow insulators for use in outdoor and indoor electrical equipment. Definitions, test methods, acceptance criteria and design recommendations.
34. IEEE 36 / 129 /NP (1995 г.). Composite line post insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V a.c. Definitions, test methods and acceptance criteria.
35. Guide for application of composite insulators. ANSI / IEEE Std 987 , 1985 , p. 12.
36. Standard for composite suspension insulators for overhead transmission line tests. ANSI Standard (C. 29. 11 , 1989).
37. Schneider H.M. , Hall J.F. , Karady G. Nonceramic insulators for transmission lines. IEEE Trans.on Power Delivery , 1989 , v. 4 , № 4 , 2214 - 2221.
38. Excerpts from the presentation of Arthur Kroese , Principal engineer Salt River Project. Insulator News and Market Report , 1996 , v. 4 , № 1 , 16 - 18.
39. Burnham J.T. , Givens P.S. , Grisham T.M. High strength polymer post insulators enable economical transmission lines with low environmental impact , 1994 , IEEE Transmission and Distribution Conference , Chicago, Illinois , April 10 - 15 , 1994.
40. Burnham J.T. Silicone rubber insulators used to improve transmission line performance in Florida. Transmission and Distribution , 1992 , v. 4 , № 8 , 20 - 23.

41. Excerpts from the presentation of Dr. John Kuffel , Ontario Hydro Technologies. Insulator News and Market Report , 1996 , v. 4 , № 1 , 19 - 22.
42. Interview with Edward Cherney , President of CSL Silicones. Insulator News and Market Report , 1995 , v. 3 , № 6 , 28 - 32.
43. Fini G.P. , Marrone G. , Sartore L. , Sena E.A. Qualification tests performed on composite insulators for 132 - 150 kV overhead lines. CIGRE , Birmingham - 93, 1993 , Pap. 3.04.
44. Marrone G. , Tavano P. Mechanical fatigue of components of overhead lines with special attention to composite insulators: laboratory and theoretical investigation to evaluate their long term performance under this stress. CIGRE 1990 , Pap. 22 - 204.
45. Fini G.P. , Marrone G. , Porrino A. Results of accelerated ageing tests on component of electric systems made with polymeric materials. CIGRE 1988 , Pap. 15 - 07.
46. Houlgate R.G. , Swift D.A. , Cimador A. , Dourbaix F. , Marrone G. Nicolini F. Field experience and laboratory research on composite insulators for overhead lines. CIGRE 1986 , Pap. 12 - 15.
47. IEC 507 (1991). Artificial pollution tests on high - voltage insulators to be used on a.c. systems.
48. ГОСТ 28856-90 Изоляторы линейные стержневые полимерные..Технические требования. Методы испытаний.
49. Tourreil C.H., Lambeth P.J. Aging of composite insulators : Simulation by electrical tests. IEEE Trans. on Power Delivery ,1990, v.5, №3,1558-1567.
50. Gorur R.S. , Cherney E.A. , Hackam R. Performance of polymeric insulating materials in salt fog. IEEE Trans. on Power Delivery , 1987 , v.2,№2 , 486 - 492.
51. Houlgate R.G. , Swift D.A. Composite rod insulators for AC power lines : Electrical performance of various design at a coastal testing station. IEEE Trans. on Power Delivery , 1990 , v.5 , №4 , 1944 - 1955.
52. Lambeth P.J. Variable voltage application for insulator pollution tests. IEEE Trans. on Power Delivery , 1988 , v.3 , № 4.
53. Schneider H.M. a.o. Accelerated aging and flashover tests on 138 kV nonceramic insulators. IEEE Trans.on Power Delivery,1993,v.8,№1,325-336.
54. De La O A. , Gorur R.S. , Chang J. AC clean fog tests on non-ceramic insulating materials and a comparisson with porcelan. IEEE Trans. on Power Delivery , 1994 , v.9 , № 4 , 2000 - 2008.

55. De La O A. , Gorur R.S. Clean - fog flashover testing of non-ceramic insulating materials. 9 th ISH , Graz , Austria , 1995.
56. Hill R.I. Laboratory analysis of naturally aged silicone rubber polymer insulators from contaminated environments, 138 to 765 kV. IEEE Trans.and Distrib. Conference , Chicago , Illinois , April 10-15 , 1994 , 488-493.
57. IEEE Standart techniques for high voltage insulator testing.Std. 4 , 1978.
58. Bauer E. a.o. Service experience with the German composite longrod insulator with silicone rubber sheds since 1967. CIGRE , 1980, Pap. 22-11.
59. Karner H. a.o. Determination on small water contents in solid organic insulating materials and the influence of moisture on the dielectric properties. CIGRE , 1984 , Pap. 15 - 02.
60. Dietz H. , Karner H. a.o. Latest developments and experience with composite longrod insulators. CIGRE , 1986 , Pap. 15 - 09.
61. Siemens moves quickly into composite insulator business. Insulator News and Market Report. , 1996 , v.4 , № 1 , 26 - 32.
62. Kuhl M. Report on properties of SIR composite insulators after longterm exposure in service. Stockholm Power Tech. Conference , 1995 , Pap. SPT IS 12 - 4.
63. Kindersberger J. , Kuhl M. Surface conductivity of polluted silicone rubber insulators. 7 th ISH , Dresden , 1991 , Pap. 43. 15.
64. Zhaoying Sun , Zhiyi Su. Service experience with composite outdoor insulation in China. RGE , 1994 , № 9 , 39 - 42.
65. Papailiou K.O. Der Verbund (- isolator) im (Netz -) Verbund. Schweizer Maschienenmarkt , 1990 , № 47 , 80 - 83.
66. Papailiou K.O. a.o. Erfahrung mit Einsatz von Verbundisolatoren. Bulletin SEV / VSE , 1990 , №19 , 11 - 18.
67. De Turreil C.H. Response of composite insulators to dynamical mechanical loads. IEEE Trans.on Power Delivery, 1990 , v.5 , №1 , 379-383.
68. Vlastos A.E. , Sherif E.M. Experience from insulators with silicone rubber sheds and shed coatings. IEEE Trans. on Power Delivery , 1990,v. 5 , № 4 , 2030 - 2036.
69. Gorur R.S. a.o. The electrical performance of polymeric insulating materials under accelerated aging in a fog chamber. IEEE Trans.onPower Delivery , 1988 , v. 3 , № 3 , 1157 - 1164.

70. Gorur R.S. a.o. Surface hydrophobicity of polymer used for outdoor insulation. IEEE Trans. on Power Delivery , 1990 , v.5 , №4 , 1923-1933.
71. De Decker D. , Wright S. Recovery and hydrophobicity transfer in silicone. Proc. of SEE Int. Workshop on Non- ceramic Outdoor Insulation.Paris , France , April , 1993 , 56 - 61.
72. Hartings R. Hydrophobicity of composite insulators : Measurement and influence on flashover performance. Stockholm Power Tech Intern. Symp. on Electr. Power Eng. , Stockholm , 1995.
73. Eklund A. , Gutman I. , Hartings R. Conditioning of silicone rubber insulators : loss and recovery of hydrophobicity. 9 th ISH , Graz , 1995.
74. Sorqvist T. , Vlastos E. Hydrophobicity loss and leakage currents of long term AC - and DC - energized polymeric insulators. Nordic Insulation Symposium , Bergen , 1996 , 249 - 256.
75. Gorur R. Improving contamination performance by preventing water filming (greases , comparison with RTV). ASU , 1993.
76. Нормы и методы лабораторных испытаний подвесных стержневых полимерных изоляторов 6 - 750 кВ (проект) , 1994.
77. Изоляторы полимерные стержневые для воздушных линий электропередачи напряжением 110 - 750 кВ. Программа и методика приемочных испытаний опытных образцов. Типовая ПМ - 1 , 1985.
78. ГОСТ 16504 - 81. Испытания и контроль качества продукции. Основные требования и определения.
79. Стандарт МЭК 383 - 2 (1993). Часть 2 : Гирлянды изоляторов и изоляторные подвески для систем переменного тока. Определения , методы испытаний и критерии приемки.
80. ГОСТ 1516.2 - 76. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.
81. ГОСТ 9920 - 89. Электроустановки переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Длина пути утечки внешней изоляции.
82. Указания по определению дугостойкости полимерных изоляторов , 1985.
83. Методические указания по определению трекинго-эрозионной стойкости полимерных конструкций наружной установки , 1980.
84. Методические указания по определению трекинго-эрозионной стойкости полимерных конструкций для работы в районах с сильным загрязнением , 1988.

85. ГОСТ 10390 - 86. Электрооборудование на напряжение свыше 3 кВ. Методы испытаний внешней изоляции в загрязненном состоянии.

