МНОГОФАКТОРНЫЕ УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА СТАРЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

АВТОРЫ:

ЕФИМОВ Е.Н.,
К.Т.Н.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ТИМАШОВА Л.В.,
К.Т.Н.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ВАГА Н.А.,
К.Т.Н.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

В настоящее время во многих странах стали применяться композитные полимерные изоляторы, это потребовало разработки новых методик испытаний для подтверждения их технических параметров. Стандартные испытания с использованием вращающихся конструкций и соляного тумана оказываются неубедительны при прогнозировании состояния изоляторов при реальных многофакторных эксплуатационных воздействиях. Для России с ее большим разнообразием климатических зон учет параметров конкретных климатических факторов в районах эксплуатации изоляторов, а также их продолжительности, является необходимым этапом при разработке технических требований.

Ключевые слова: полимерный изолятор, старение, многофакторные ускоренные испытания, климатические зоны.

Опорные полимерные изоляторы на подстанции 220 кВ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время как в России, так и за рубежом широко применяются композитные полимерные изоляторы (ПИ).

Применение полимерных изоляторов сопровождалось разработкой методик испытаний для подтверждения их технических параметров.

Стандартные испытания с использованием вращающихся конструкций и соляного тумана (колесный тест), воспроизводящие не более двух основных воздействий, оказываются неубедительными при оценках прогнозирования состояния ПИ при реальных многофакторных эксплуатационных воздействиях.

5000-часовый многофакторный метод испытания трекингэрозионной стойкости кремнийорганических оболочек ПИ, на начальном этапе предложенный в IEC 1109-92 (замененный затем на IEC 1109-08 [1], а впоследствии приведенный в техническом отчете IEC/TR 62730-12 [2] рекомендуется в основном для проведения исследовательских работ.

Однако этот метод испытаний во многих странах получил дальнейшее развитие и стал применяться при ускоренных испытаниях на старение полимерных изоляторов. Метод предусматривал механическое воздействие, изменение длительности воздействующих факторов и последовательности их действия, учет климатических факторов конкретного района эксплуатации полимерных изоляторов.

Для России с ее большим разнообразием климатических зон учет параметров конкретных климатических факторов в районах эксплуатации ПИ, а также их продолжительности является необходимым этапом при разработке требований к ПИ, обеспечивающих длительное сохранение работоспособного состояния ПИ при эксплуатации.

КОНСТРУКЦИЯ КОМПОЗИТНОГО ПОЛИМЕРНОГО ИЗОЛЯТОРА

Полимерные изоляторы появились в конце 1950-х годов. Однако лишь в середине 1970-х годов с появлением новых изоляционных материалов стали выпускаться композитные полимерные изоляторы.

Применяемые в настоящее время композитные полимерные изоляторы конструктивно представляют собой стеклопластиковый стержень или трубу, имеющий внешнюю полимерную изоляцию, и заделанные по торцам оконцеватели (опорные фланцы).

Стеклопластиковый стержень или труба, выполняющий механические функции, обычно изготавливается из эпоксидных смол различных рецептур, армированных длинными стеклянными нитями.

Внешняя полимерная изоляция, выполненная в виде кремнийорганической оболочки, защищает стеклопластиковый стержень или трубу от влияния внешних климатических факторов.

В большинстве полимерных изоляторов между компонентами присутствуют несколько поверхностей раздела. Поверхности раздела должны обеспечивать перенос механических нагрузок с одного материала на другой и быть устойчивыми к электрическому напряжению. Наиболее важной считается поверхность, на которой необходимо создать химическое соединение с запланированной надежностью в зоне оконцевателя, в которой происходит соприкосновение металлической арматуры, оболочки и воздуха (так называемая тройная точка).

В настоящее время на воздушных линиях и на подстанциях применяются следующие виды композитных полимерных изоляторов (рис. 1):

- линейные;
- линейные опорные;
- опорные.

С началом применения композитных полимерных изоляторов в электроэнергетических компаниях естественно возникли вопросы их надежности в условиях эксплуатации.

СТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЛИМЕРНЫЙ ИЗОЛЯТОР В СООТВЕТСТВИИ С РЕКОМЕНДАЦИЯМИ МЭК

Стандартные методы испытания имеют целью воспроизведение последствий одного или нескольких воздействий на высоковольтные композитные полимерные изоляторы, которые могут проявиться в течение их срока эксплуатации.

Основными воздействиями на композитные полимерные изоляторы, одновременно встречающимися при эксплуатации, являются:

- электрические воздействия (напряжение линии, перенапряжение);
- механические воздействия (масса проводов и механические перегрузки от проводов при наличии ветра, снегопада и гололедного осадка);
- климатические воздействия.

Указанные типы воздействий зависят от условий окружающей среды. Они видоизменяются, в частности с изменением температуры, в зависимости от степени загрязнения и наличия влажности, тумана, обледенения, ветра, молнии. К этим воздействиям прибавляется воздействие солнечного облучения (УФ-облучения).

Рассматриваемые комбинированные воздействия могут привести к значительному повреждению полимерных изоляторов. Эти воздействия могут проявляться в виде различных повреждений поверхности кремнийорганической оболочки, разрушения стержня или границы раздела различных составных частей полимерных изоляторов и, следовательно, могут привести к снижению электрической и механической прочности или выходу изолятора из строя.

Самые распространенные и чаще всего проводимые стандартные испытания, представленные в российских и международных стандартах [1], [3], [4], [5], [6], воспроизводят обычно не более двух основных воздействий.

Первый вид испытаний на трекингэрозионную стойкость — так называемый колесный тест, при проведении которого изоляторы размещаются на конструктивном элементе в виде колеса и подвергаются при вращении поочередно загрязнениям жидким компонентом с определенной проводимостью, как правило путем погружения, до того как подается электрическое напряжение. Продолжительность испытания составляет 30 000 циклов, т. е. порядка 1 700 часов.

Испытание на трекингэрозионную стойкость в течение 1000 часов в условиях солевого тумана при воздействии электрического напряжения.

Испытание в течение 1000 часов в климатической камере (рис. 2) в условиях воздействия ультрафиолетового облучения в сочетании с влажной атмосферой.

Термомеханические испытания в течение 96 часов, когда изоляторы при воздействии постоянной механической нагрузки подвергаются циклам значительного температурного перепада.

Эти четыре типа испытаний проводятся для выбора материалов и не требуют наличия дорогостоящего оборудования.

Однако, учитывая ограниченность набора воздействующих факторов, результаты этих испытаний не могут служить основанием для прогнозирования поведения композитных полимерных изоляторов при реальных многофакторных эксплуатационных воздействиях.

Обеспечение повышенных свойств полимерных изоляторов предполагает тщательный выбор конструкции, исходных материалов, отработку технологии и подтверждение этих свойств длительными испытаниями на трекингэрозионную стойкость при многофакторных воздействиях.

Нормируемые в российских и международных стандартах трекингэрозионные испытания проводятся при постоянно приложенном электрическом напряжении и при цикличном и комбинированном воздействии следующих факторов:

- температура и влажность;
- дождь;
- соляной туман, имитирующий загрязнение;
- УФ-облучение.

Для оценки результатов процессов старения стандарты МЭК рекомендуют проводить многофакторные длительные 5000-часовые испытания полимерных изоляторов.

Такие испытания были разработаны специалистами французской фирмы EDF и включали многофакторные воздействия в течение 24-часового цикла при общей длительности испытаний 5000 часов и при приложении напряжения 24/√3 кВ. Суточный цикл и значения воздействующих факторов, показанные в таблице 1 и включающие периоды деминерализованного дождя, нагревания, увлажнения, соляного тумана и УФ-облучения, были приняты за основу в стандарте IEC 1109 (Приложение C) [1] (таблица1) как альтернативное к стандартным испытаниям для воспроизведения условий окружающей среды. Репрезентативность испытаний подтверждалась сравнением повреждений, полученных во время испытаний и в полевых условиях. Сравнение длительности испытаний, при которых достигаются идентичные повреждения в лаборатории и в полевых условиях, позволили определить фактор ускорения испытаний на старение для этих полевых условий эксплуатации. Для Франции это отношение оценивалось как 15 и основывалось на результатах эксплуатации

СУТОЧНЫЙ ЦИКЛ ПО IEC 1109

Время, ч	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
Влажность 95%												
Температура, 50 °C												
Дождь												
Солевой туман, 7 кГ/м^3												
УФ-облучение, 0,9 кВт/м^2												
Напряжение,Uф												

Таблица 1

в условиях местности St. Remy. Этот район определял условия загрязнения, встречающиеся во Франции. Ускоренные испытания на старение, таким образом, оказывались эквивалентными 10 годам естественного старения в условиях эксплуатации.

5000-часовые трекингэрозионные испытания были включены в ранние издания международных и национальных стандартов, в которых отмечается, что многофакторные трекингэрозионные испытания часто называют испытаниями на ускоренное старение. Однако по сути они не являются ускоренными испытаниями на старение, поскольку не воспроизводят условий деградации полимерных изоляторов в реальных условиях эксплуатации (в частности не учитывается воздействие механических сил и т. п.) и не способствуют получению оценок срока жизни. Они лишь позволяют выявлять потенциальные недостатки в исходных материалах и конструкциях.

Поэтому во 2-м издании IEC 62217 [6] в качестве нормативного трекингэрозионного испытания основных видов полимерных изоляторов предложено лишь одно испытание — 1000-часовое в соляном тумане, которое устанавливает минимальные требования для материала оболочки.

Тем не менее следует отметить, что применительно к полимерным изоляторам в технической литературе 5000-часовые трекингэрозионные испытания трактуются как многофакторные ускоренные испытания на старение.

Многие фирмы проводят 5000-часовые испытания по IEC 1109, но при этом вносят свои коррективы в параметры отдельных факторов.

МНОГОФАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Основываясь на многофакторных воздействиях, реализуемых при проведении испытаний по IEC 1109 в течение 5000 часов, многие компании осуществляли корректировку параметров климатических воздействий с учетом реальных климатических условий в районе эксплуатации полимерных изоляторов.

В этих случаях при проведении испытаний в лабораторных условиях оказывалось возможным отбирать из числа испытанных те полимерные изоляторы, которые удовлетворяли имеющимся требованиям в районе эксплуатации.

5000-ЧАСОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ В ИТАЛИИ [7]

Компания ENEL (Италия) разработала методику испытаний на старение, основанную на применении тех же воздействующих факторов, которые регламентированы в СИГРЭ, но при использовании 7-дневного цикла, включающего циклы покоя, без подключения электрического напряжения (обычно проводятся в конце недели), в течение которых изоляторы подвергаются УФ-излучению.

Помимо этого, при выполнении этого испытания предусматриваются циклы подачи солевого тумана при солесодержании 80 кг/м^3. что соответствует сильному загрязнения, как указано в публикации IEC 60815 [16].

Испытания ПИ на напряжение 132–150 кВ проводились в 80-х годах с целью выбора типов ПИ, которые предполагалось использовать на территории Италии безотносительно к району установки. Установка позволяла проводить испытания на полномасштабных изоляторах на напряжения до 540 кВ.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦИКЛ

Время, ч	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
Влажность												
Температура												
Дождь												
Солевой туман												
УФ-облучение												
Напряжение												

Таблица 2

Для сокращения продолжительности испытания на старение оптимизированные циклы воздействий не предусматривают периодов покоя, в течение которых накладывается только рабочее электрическое напряжение. В рабочих условиях периоды электрической активности на изоляторах ограничены во времени (утренняя конденсация, туман); им часто предшествуют и за ними следуют продолжительные периоды покоя, составляющие иногда несколько недель, в соответствии с записями токов утечки, выполненных на месте работы.

В течение различных испытаний применялось УФ-облучение для моделирования солнечной радиации с уровнем 1,5 кВт/м^2 вместо 0,9, принятого в испытаниях СИГРЭ.

Используемые спектры могут быть разными от одного испытания к другому. Но, несмотря на то что воздействие УФ облучения на большинство эластомеров, имеющихся на сегодняшний день на рынке, незначительны, их всё же надо учитывать при расшифровке результатов различных испытаний.

Нагревание обеспечивалось теми же лампами для моделирования солнечной радиации, что объяснялось упрощением установки и фактом, что в большинстве случаев в реальных условиях нагрев происходит в солнечные дни.

Испытания на старение считались успешными при отсутствии:

- пробоев по границам раздела и по стержню;
- разрушений оболочки и потери наполнителя;
- следов эрозии глубиной более 30% от толщины оболочки;
- трэков (рис. 3).

5000-ЧАСОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ В ЯПОНИИ [8]

Японские специалисты применили многофакторный метод испытаний в соответствии с IEC 61109-92 в качестве ускоренного метода испытаний на старение материала оболочки полимерного изолятора.

Однако, чтобы при этом были испытаны на старение конструктивные элементы (адгезионная стойкость концевых заделок и оболочки), в большой испытательной камере соленого тумана с габаритами 4,4 × 4,4 × 3,3 м^3 разместили устройство для нагружения изоляторов постоянным усилием в 20 кН.

В таблице 2 показан испытательный цикл с параметрами основных воздействующих факторов (в соответствии с рис.1) с добавлением растягивающей нагрузки, реализованный в течение 5000 часов.

Этот метод испытаний позволил оценить деградацию полимерного изолятора при электрических и механических воздействиях за счет воспроизведения в короткий промежуток времени и затем повторным воздействием факторов, вызванных изменениями погоды.

Оценка результатов испытаний выполнялась непрерывным измерением токов утечки, регулярным измерением гидрофобности поверхности изолятора и анализом состояния поверхности с помощью электронной микроскопии и рентгеновской спектрометрии.

Результаты визуальных и инструментальных обследований не выявили следов старения.

5000-ЧАСОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ В КНР [9]

Полимерные изоляторы используются в Китае для регионов со средним и сильным загрязнением. В связи с тем, что сроки эксплуатации полимерных изоляторов на ВЛ 500 кВ переменного тока превышают 10 лет, а на ВЛ ±500 кВ составляют около 7 лет, исследователям, сетевым компаниям и производителям приходится уделять всё большее внимание характеристикам длительного старения различных полимерных изоляторов.

Поскольку одним из основных свойств кремнийорганических материалов является способность

восстанавливать гидрофобность, при рассмотрении вопросов старения полимерных изоляторов загрязнение и гидрофобность учитывались в первую очередь.

Многофакторные испытания ПИ преследуют две цели. Первая — это воспроизводимость процесса естественного старения, а вторая — вскрытие конструктивных недостатков.

Для реализации этих целей предложена процедура испытаний, показанная в таблице 3, включающая два дня на цикл, который повторяется в течение 5000-часовых испытаний.

По сравнению с существующими многофакторными испытаниями эта процедура увеличивает длительность загрязненного тумана и УФ-облучения в каждом цикле, что позволяет обеспечить достаточный промежуток времени для аккумулирования загрязнений, увлажнения, разрядов и потери гидрофобности образцов в фазе тумана.

В соответствии с этой процедурой были испытаны 27 полимерных изоляторов. Изоляторы различались конструкциями ребер и оболочек, их профилем и были изготовлены различными фирмами.

Испытания выполнялись в следующей последовательности:

- одно 5000-часовое испытание с изоляторами на переменном напряжении;
- два 5000-часовых испытания с изоляторами на постоянном напряжении;
- еще одно 5000-часовое испытание с изоляторами на переменном напряжении.

ПРЕДЛОЖЕННЫЙ ДВУХДНЕВНЫЙ ЦИКЛ

Время	0–24	24–48
Высокое напряжение		
Дождь (10 мкСм/см)		
Влажность 100%		
Нагрев 50 °C		
Загрязнение ESDD (проводящее, растворимое)		
Туман NSDD (непроводящий, нерастворимый)		
Солнечное облучение		

Таблица 3

Предложенная методика испытаний является более жесткой, чем представленные в IEC 61109 и 62217, в отношении отдельных воздействующих факторов, в частности по следующим позициям:

- замена соленого тумана смесью растворимого вещества NaCl и нерастворимого Kieselguhr, чтобы моделировать загрязнение в эксплуатации в виде NSDD и ESDD;
- увеличение длительности воздействия фазы тумана и солнечной радиации до 24 часов в одном цикле, что обеспечивает достаточно времени для восстановления гидрофобности при солнечном облучении и для увлажнения поверхности и развития разрядов при тумане.

Явления старения, представленные в виде укороченного по времени процесса потери гидрофобности и более продолжительного периода ее восстановления, продолжаются в течение времени испытаний (т. е. вплоть до 5000 часов). Результаты свидетельствуют, что многофакторная процедура может выявлять характеристики полимерных изоляторов в загрязненных районах.

МНОГОФАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН

В последние годы отдельные фирмы при проведении многофакторных испытаний полимерных изоляторов на старение считают необходимым более детально учитывать воздействующие факторы и особенности климатических зон, где предполагается эксплуатация полимерных изоляторов, с учетом погодных циклов в течение года.

Считается обоснованным включать в число воздействующих факторов механические усилия и выбирать параметры воздействующих факторов, длительности и последовательности их чередования, исходя из конкретных условий эксплуатации, а не следовать процедурам, рекомендуемым в стандартах МЭК.

ЛЕТНИЕ И ЗИМНИЕ ЦИКЛЫ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Факторы	Летний цикл (дни)										Зимний цикл (дни)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Соляной туман																				
Дождь																				
Температура. Влажность																				
УФ-облучение																				
Напряжение																				
Механич. нагрузка																				

Таблица 4

МНОГОФАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ В США [11]

Методика ускоренных испытаний на старение полимерных изоляторов с воспроизведением специфичных условий окружающей среды, встречаемых в береговых местностях Флориды (США), были разработаны институтом EPRI и лабораторией HVTRC.

Разработчики программы испытаний считали, что один год эксплуатации в этих местностях соответствует испытанию в течение 10 дней летнего цикла с последующими 11 днями зимнего цикла. В соответствии с такими испытательными циклами фактор ускорения составлял 17.

Загрязнение применялось только в течение зимнего периода. Солесодержание при циклах подачи солевого тумана было ограничено и составляло 2,5 кг/м^3, что для рассматриваемого района было более показательно. Действительно, испытания, проведенные при том же солесодержании (7 кг/м^3), что и при 5000-часовом испытании по IEC 1109-92, приводили к нереальным изменениям поверхности, связанным со слишком высокой электрической активностью.

УФ-лампы для имитации солнечной радиации давали спектр, близкий к нормальному солнечному свету.

Испытания выполнялись на полномасштабных изоляторах на напряжения до 138 кВ.

МНОГОФАКТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ В КОРЕЕ [11]

Фирмой KEPCO в Корее разработан ускоренный метод испытаний полимерных изоляторов на старение, который учитывал различные испытательные методы, предложенные IEC, EPRI и пр., а также климатические условия Кореи.

Проведение многофакторных испытаний служит достижению двух целей: стимулировать производителей в разработке новых ПИ и помочь KEPCO в выборе для своих сетей только ПИ с гарантированной надежностью.

Многофакторный 3000-часовой метод ускоренных испытаний разработан для оценки надежности полимерных изоляторов, при котором лучше имитируются как большая температура и резкие сезонные колебания температур (летом и зимой), так и, главным образом, интенсивный соляной туман, характерный для морского побережья.

В отличие от существующих методов ускоренных испытаний рассматриваемый метод предполагает использовать удлиненные циклы, т. е. 10-дневный летний цикл и 10-дневный зимний цикл применяются попеременно в течение 3000 часов испытаний. В специально изготовленной камере размещались 16 полимерных изоляторов: 12 установлены вертикально, 4 — горизонтально. Во время испытаний предусматривалось осуществлять непрерывный мониторинг токов утечки по поверхности.

Параметры отдельных воздействующих факторов, отличающиеся от рекомендованных МЭК (рис.1), но соответствующие условиям Кореи, приведены ниже:

- температура/влажность:
  - летний цикл — 50 ± 2 °C; влажность 95%;
  - зимний цикл — 5 ± 2 °C; влажность 50%;
- растягивающая нагрузка — 2,4 т (33% от нормированной разрушающей механической нагрузки) ± 5%.

В таблице 4 представлены летние и зимние циклы ускоренных испытаний со старящими факторами, разработанные специально для Кореи.

После 3000-часовых испытаний выполнялись следующие процедуры для оценки состояния полимерных изоляторов.

Визуальный осмотр показал, что:

- источник напряжения не отключался в течение испытаний вследствие перекрытий;
- сердечник не обнажился вследствие эрозии;
- не возникло треков ни на оболочке, ни на тарелках;
- не обнаружено проникновение воды ни в оболочку, ни в тарелки;
- сохранилась плотность между оболочкой и металлическими частями.

Рис. 1. Опорные и линейные полимерные изоляторы

Электрические испытания выявили, что:

- напряжение перекрытия в сухом состоянии – свыше 95% от нормированного значения;
- напряжение перекрытия в увлажненном состоянии свыше 80% от нормированного значения;
- импульсное напряжение перекрытия – свыше 92% от нормированного значения.

В настоящее время полевые испытания в течение 18 месяцев являются обязательными, предшествующими коммерческому применению вновь разработанных полимерных изоляторов в Корее.

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К МНОГОФАКТОРНЫМ ИСПЫТАНИЯМ

Как показал проведенный анализ, при проведении многофакторных испытаний в различных странах пытаются корректировать как циклы, так и параметры воздействующих факторов, рекомендуемых МЭК, с учетом реальных эксплуатационных условий.

В стандартах МЭК отмечается, что многофакторные трекингэрозионные испытания часто называют испытаниями на ускоренное старение. Однако по сути они не являются ускоренными испытаниями на старение, поскольку они не воспроизводят процессов деградации полимерных изоляторов, имеющих место в реальных условиях эксплуатации (в частности не учитывается воздействие механических сил и т. п.) и не способствуют получению оценок их срока службы. Они лишь позволяют выявлять потенциальные недостатки в исходных материалах и конструкциях.

Поэтому во 2-м издании IEC 62217 [6] в качестве нормативного трекингэрозионного испытания предложено лишь одно испытание — 1000-часовое в соляном тумане, которое устанавливает минимальные требования для материала оболочки любых типов полимерных изоляторов и является наиболее экономически приемлемым.

Многолетние исследования, проведенные специалистами Технических комитетов СИГРЕ, позволили сделать вывод, что механизм старения полимерных изоляторов в общем не выявляет прогрессивного снижения со временем легко измеряемых и вызванных старением свойств ПИ. Переход от «работоспособного» состояния к «предельному» очень часто происходит быстро и без предупредительных симптомов. Время и скорость этого перехода зависят от множества параметров, включающих как исходные материалы и конструкции полимерного изолятора, так и условия эксплуатации. Для исследования этих процессов Технический комитет рекомендует проводить 5000-часовые испытания в соответствии с IEC/TR 62730 [2].

Для прогнозирования долговременных характеристик композитных полимерных изоляторов необходимо проводить многофакторные испытания с учетом электрических и механических нагрузок и параметров климатических районов прохождения трассы ВЛ и с учетом рекомендаций ГОСТ 27905.1[12].

На современном уровне развития техники ускорение процессов старения при многофакторных испытаниях обычно достигают путем одновременного изменения параметров ограниченного количества воздействующих факторов.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ХОЛОДНОГО ПЕРИОДА ГОДА ДЛЯ НЕКОТОРЫХ РАЙОНОВ РОССИИ (ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ И СИБИРИ)

Район России	Минимальные температуры, °C	Продолжительность холодного периода с Т °C≤0, дни/мес.	Относительная влажность, %
Краснодарский край	(–23 °C) – (–27 °C)	60/2	83
Волгоградская область	(–29 °C) – (–33 °C)	120/4	85
Средняя полоса Европ. части	(–35 °C) - (–48 °C)	155/5	85
Красноярский край	(–50 °C) – (–60 °C)	185/6	77
Амурская область	(–38 °C) – (–52 °C)	182/6	73
Ханты-Мансийский АО	(–41 °C) – (–53 °C)	205/7	74
Саха–Якутия	(–44 °C) – (–62 °C)	220/7	76

Таблица 5

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛОГО ПЕРИОДА ГОДА ДЛЯ НЕКОТОРЫХ РАЙОНОВ РОССИИ (ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ И СИБИРИ)

Район России	Максимальные температуры, °C	Продолжительность теплого периода с Т °C≤0, дни/мес.	Относительная влажность, %
Краснодарский край	30 °C – 42 °C	10	66
Волгоградская область	31 °C – 45 °C	8	50
Средняя полоса Европейской части	25 °C – 38 °C	7	70–74
Красноярский край	24 °C – 39 °C	6	70
Амурская область	26 °C – 41 °C	6	77
Ханты-Мансийский АО	20 °C – 35 °C	5	73
Саха-Якутия	21 °C – 39 °C	5	66

Таблица 6

СООТНОШЕНИЕ ТЕПЛЫХ И ХОЛОДНЫХ МЕСЯЦЕВ В ГОДУ

Район России	Соотношение Тепл./хол.	Испытательные циклы, сут.	
		Летний	Зимний
Краснодарский край	10/2	10	2
Волгоградская область	8/4	8	4
Средняя полоса Европ. части	7/5	7	5
Красноярский край	6/6	6	6
Амурская область	6/6	6	6
Ханты-Мансийский АО	5/7	5	7
Саха–Якутия	5/7	5	7

Таблица 7

ЧЕРЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИСПЫТАНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Факторы	Летний цикл (дни)							Зимний цикл (дни)				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Соляной туман												
Дождь												
Температура												
Влажность												
УФ-облучение												
Напряжение												
Механическая нагрузка												

Таблица 8

На данный момент отсутствует информация о возможных предельных значениях воздействующих факторов, при которых происходит старение изоляции. Поэтому значения воздействующих факторов принимаются обычно в соответствии с реальными условиями окружающей среды, а ускорение испытаний достигается повышением частоты воздействия каждого из выбранных факторов.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ 5000-ЧАСОВЫХ МНОГОФАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ В РОССИИ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

В последние годы отдельные зарубежные фирмы при проведении многофакторных испытаний полимерных изоляторов считают более обоснованным выбирать длительности и последовательности чередования воздействующих факторов, исходя не из 24-часового цикла, рекомендуемого МЭК, а многодневного цикла [10, 11].

Многофакторные испытания предполагают учет климатических факторов, воздействующих на полимерные изоляторы в процессе эксплуатации.

Районы эксплуатации ПИ в России отличаются большим разнообразием климатических факторов и их цикличностью. Следовательно, необходимо учитывать сложную комбинацию сезонных климатических воздействий, проявляющихся в течение года.

При рассмотрении климатических воздействий на полимерные изоляторы, устанавливаемые в различных климатических зонах России, целесообразно выделять, по крайней мере, летние и зимние периоды, которые в соответствии с [13] определяются как климатические параметры холодного и теплого периода.

В частности, для средней полосы Европейской части России (54–56° северной широты) и для некоторых географически удаленных друг от друга районов России, в соответствии с [13], основные климатические параметры и длительности их воздействия представлены в таблицах 5 и 6.

В таблице 7, исходя из соотношений теплых и холодных месяцев в году, приведены летние и зимние испытательные циклы.

В качестве примера рассмотрим условия испытаний для средней полосы Европейской части России.

В соответствии с таблицей 7 для средней полосы Европейской части России можно ориентироваться на 7-суточный летний цикл и 5-суточный зимний цикл.

В соответствии с этим соотношением выбирается 12-суточный цикл испытаний полимерных изоляторов, который принято считать

СУММАРНАЯ СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ И ВЕРТИКАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТИ В ЛЕТНИЙ И ЗИМНИЙ ЦИКЛЫ ПРИ БЕЗОБЛАЧНОМ НЕБЕ НА ШИРОТАХ 54–56°

Период	Солнечная радиация на горизонтальную поверхность. МДж/м^2	Солнечная радиация на вертикальную поверхность, МДж/м^2
Лето (июнь)	880	550
Зима (март)	470	673

Таблица 9

эквивалентным одному году эксплуатации изоляторов в соответствующей зоне.

При ускоренных испытаниях 12-суточные циклы повторяются 15 раз в течение всего времени испытаний, т. е. полный цикл испытаний должен составлять не менее 4500 часов в соответствии с рекомендациями IEC 61109 на проведение длительных испытаний на старение.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЧЕРЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

При выборе последовательностей чередования воздействующих факторов следует учитывать способность кремнийорганических материалов восстанавливать гидрофобность, т. е. в испытаниях, подтверждающих надежность, должен воспроизводиться естественный процесс потери гидрофобности в дождливые и туманные летние дни и ее восстановления в последующие ясные дни за счет переходных процессов от силикона к загрязненной поверхности.

Чередование воздействующих факторов при проведении испытаний полимерных изоляторов — в таблице 8.

Необходимые напряжение и механическая нагрузка при испытании полимерных изоляторов должны поддерживаться постоянными.

ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ, ИМИТИРУЮЩИХ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В соответствии с таблицами 5 и 6, нормальными значениями эксплуатационных температур и относительной влажности в средней полосе являются соответственно: в летний период — плюс 38 °С и 74 %, в зимний период — минус 48 °С и 85 % (для сравнения: в Красноярском крае плюс 39 °С — 70 % и минус 60 °С - 80 %, то есть, лишь в этом случае температура минус 60 °С будет соответствовать району эксплуатации по ГОСТ 15150 и ГОСТ 15543.1).

Интенсивность дождя моделируется в соответствии с ГОСТ Р 55194 [14].

В реальных условиях длительной эксплуатации характеристики поверхностного загрязнения изоляторов определяются растворимым (ESDD) и нерастворимым (NSDD) компонентами. Оба вида загрязнения влияют на процессы потери и восстановления гидрофобности.

Согласно [15], в качестве загрязняющих веществ при испытании рекомендуется применять суспензии, содержащие в своем составе инертное связующее и проводящие вещества.

В соответствии с [13] в таблице 9 представлены данные по суммарной солнечной радиации на горизонтальную и вертикальную поверхности в летний и зимний циклы при безоблачном небе в середине июня на широтах 54–56°.

При проведении испытаний солнечная радиация (УФ-облучение, табл. 8) может имитироваться ксеноновой лампой с номинальной мощностью излучения 6500 Вт и оборудованной боросиликатными стеклянными фильтрами, обеспечивающими необходимый уровень радиации, как рекомендуется в стандартах [2], [4], [5].

ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

К полномасштабным полимерным изоляторам должно прикладываться испытательное напряжение в соответствии с таблицей 10 [3], которое должно быть неизменным в течение всего испытания.

ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Класс напряжения, кВ	110	220	330	500
Испытательное напряжение, кВ	80	160	230	335

Таблица 10

Рис. 2. Испытательная камера

При проведении испытаний на макетах величина испытательного напряжения пересчитывается пропорционально длине изоляционной части.

В соответствии с таблицей 8, к полимерным изоляторам в зависимости от типа должны прикладываться различные испытательные механические воздействия:

- растягивающее для линейных ПИ, равное 60% от нормированного механического разрушающего усилия;
- консольное либо крутящий момент для опорных ПИ, равный соответственно 50% или 30% от нормированного механического разрушающего консольного усилия либо крутящего момента.

ТРЕБОВАНИЯ К ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ

Многофакторные ускоренные испытания на старение необходимо проводить в герметичной коррозионно-стойкой и теплоизолированной испытательной камере. Камера должна быть таких размеров, чтобы расстояние от испытуемых изоляторов до ее стенок было не менее половины длины изоляторов, но не менее 1,2 м.

Камера должна быть снабжена необходимым оборудованием для воспроизведения воздействующих факторов и устройствами для диагностического контроля в течение всего периода испытаний.

Камера должна иметь изолированный иллюминатор, снабженный специальным подвижным фильтром, не пропускающим ультрафиолетовые лучи, для обеспечения наблюдения за состоянием оборудования, находящегося внутри камеры, во время проведения испытаний.

Испытательная камера должна иметь следующее оборудование:

- устройства для нагрева и охлаждения, которые должны обеспечивать соответственно нагрев испытуемых изоляторов и вспомогательного оборудования до +550 °С и их охлаждение до –600 °С и поддерживать эти температуры в течение заданных циклов;
- устройства для имитации влажности, которые выполняются в виде генераторов пара, которые должны обеспечивать равномерное распределение пара по поверхностям всех изоляторов. Генерирование тумана вокруг испытуемого изолятора должно проводиться до конца каждого отдельного испытания с постоянным устойчивым расходом, о чем можно судить по контролю давления пара;
- устройства для имитации дождя; искусственный дождь обеспечивается соплами (разбрызгивателями), установленными над испытуемыми образцами. Средняя скорость полива выбирается в соответствии с ГОСТ Р 55194 [14]. Минимальное сопротивление используемой воды должно равняться 85 Ом. Каждый из испытуемых образцов опрыскивается отдельно;
- устройства для создания загрязняющего тумана; загрязняющий туман распыляется соплами такого же типа, как указано в рекомендациях МЭК 60507 [17], каждый из испытуемых образцов опрыскивается отдельно. Каждое распыляющее сопло (насадка) устанавливается ниже соответствующих испытуемых образцов и направляется вверх к их центру под углом 40° к горизонтальной поверхности;
- устройства (лампы) для имитации солнечной радиации; имитация солнечной радиации в периоды летних и зимних циклов обеспечивается ксеноновой лампой с но

ИНФОРМАЦИЯ

ПОЛИМЕРНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

В последние годы применение полимерных изоляторов в электроустановках высокого напряжения во многих странах неуклонно расширяется.

Все высоковольтные изоляторы, в которых применяются полимерные материалы можно классифицировать так: композитные изоляторы с применением нескольких полимерных материалов; цельные изоляторы из одного полимерного материала; традиционные изоляторы, покрытые тонкой полимерной оболочкой.

В России распространены композитные изоляторы (линейные, подстанционные). Линейные изоляторы до напряжения 500 кВ включительно выполняются в виде одного элемента, на большие напряжения (750 кВ, 1150 кВ) применяются гирлянды, состоящие из двух изоляторов.

Композитные полимерные изоляторы представляют собой стеклопластиковый стержень, имеющий внешнюю полимерную изоляцию и заделанные по торцам опорные фланцы.

- минальной мощностью излучения 6500 Вт, оборудованной боросиликатными стеклянными фильтрами; расстояние между ксеноновой лампой и испытуемыми образцами должно быть близко 480 мм; при проведении испытаний полимерных изоляторов, предполагаемых к эксплуатации на широтах 54–56°, солнечная радиация на горизонтальную и вертикальную поверхности в летний и зимний циклах будет являться более жесткой, т. е. является ускоряющим воздействующим фактором;
- устройства подвода испытательного напряжения; при испытании должен применяться трансформатор, обеспечивающий в момент скачков тока утечки в установившемся режиме испытаний (при пороговом значении тока в 1 А) снижение напряжения на испытуемых изоляторах не более чем на 10%;
- устройства для имитации механических нагрузок; в зависимости от вида полимерного изолятора (линейный или опорный) устройство должно обеспечивать механические усилия либо на растяжение, либо на изгиб или кручение;
- устройства для диагностического контроля; испытательная камера должна быть оборудована измерительной схемой для непрерывного контроля токов утечки с испытуемых полимерных изоляторов в течение всего периода испытаний.

При механических испытаниях опорных полимерных изоляторов нижний фланец полимерных изоляторов должен крепиться неподвижно к основанию камеры. В плоскости торца верхнего фланца изоляторов подсоединяют подвижную часть, обеспечивающую приложение изгибающей силы или крутящего момента перпендикулярно оси изоляторов.

ПРОЦЕДУРА ПРОВЕДЕНИЯ МНОГОФАКТОРНЫХ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА СТАРЕНИЕ

Перед установкой полимерных изоляторов в испытательную камеру должны быть проведены следующие мероприятия:

- промыты деионизированной водой и просушены испытуемые полимерные изоляторы;
- зафиксированы геометрические параметры и состояние поверхности испытуемых полимерных изоляторов;
- зафиксированы уровни возникновения и напряженности погасания частичных разрядов.

По завершении каждого летнего и зимнего циклов должны проводиться осмотры изоляторов со снятием напряжения.

При осмотрах оценку результатов испытаний следует выполнять также измерением гидрофобности и анализом состояния поверхности полимерных изоляторов (с фиксацией повреждений) с помощью электронной микроскопии и рентгеновской спектрометрии.

Длительность перерывов в испытании не должна превышать времени, необходимого для осмотра изоляторов и технологической переподготовки испытательной установки.

НЕКОТОРЫЕ ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ

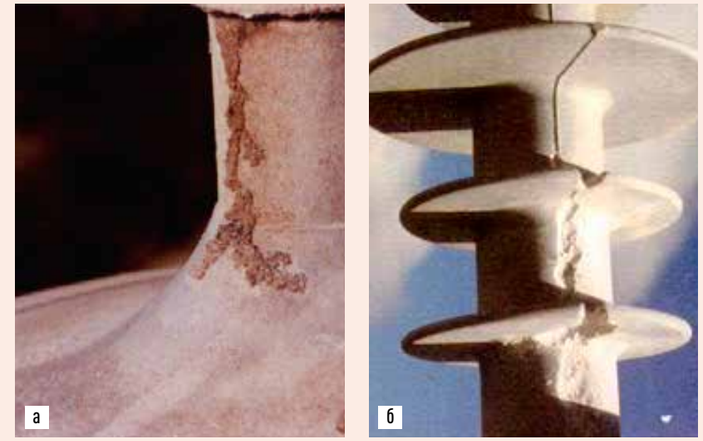

Рис. 3. (а) трекинг – образование проводящих дорожек, (б) эрозия

Периоды остановок не должны включаться в общее время проведения испытаний.

При испытаниях в качестве дополнительной меры контроля степени загрязнения рекомендуется непрерывно проводить регистрацию токов утечки по поверхности испытуемых изоляторов.

ПРОВЕДЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР ПОСЛЕ ЗАВЕРШЕНИЯ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

После завершения ускоренных испытаний должен выполняться визуальный осмотр ПИ для проверки того, что:

- источник напряжения не отключался в течение испытаний вследствие перекрытий;
- сердечник не обнажился вследствие эрозии;
- поверхность защитной оболочки изоляторов осталась гладкой, без пузырей, раковин, сколов, трещин, вспучивания, облоя, и соответствует требованиям нормативно-технической документации;
- не возникло треков ни на оболочке, ни на тарелках;
- не обнаружено проникновение воды ни в оболочку, ни в тарелки;
- сохранилась плотность между оболочкой и металлическими частями.

Должна выполняться оценка гидрофобности поверхности испытуемых полимерных изоляторов и следующие контрольные электрические испытания для проверки:

- уровня возникновения частичных разрядов;
- напряжения перекрытия в сухом состоянии;
- напряжения перекрытия в увлажненном состоянии;
- импульсного напряжения перекрытия;
- среднего разрядного переменного напряжения при плавном подъеме в сухом состоянии;
- воздействия испытательного переменного напряжения в течение 30 мин.

Изоляторы, которые выдержали электрические испытания, подвергаются контрольным испытаниям на механическую прочность:

- приложением, в зависимости от типа полимерного изолятора, испытательной растягивающей или изгибающей силы, или испытательного крутящего момента в течение 1 мин.;
- приложением, в зависимости от типа полимерного изолятора, нормированного значения разрушающей растягивающей или изгибающей силы, или нормированного значения разрушающего крутящего момента с доведением изоляторов до разрушения.

После проведения электрических и механических контрольных испытаний следует провести испытания по определению:

- класса гидрофобности защитной оболочки;
- стойкости к проникновению воды;
- адгезии оболочки к изоляционному телу;
- стойкости к проникновению красящей жидкости.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Успешное завершение многофакторных ускоренных испытаний полимерных изоляторов на старение, то есть отсутствие у полимерных изоляторов, прошедших испытания, существенных и критических повреждений, свидетельствует о возможности

ПИ длительно сохранять работоспособное состояние при эксплуатации в условиях соответствующей климатической зоны при условии выбора старения в качестве основного критерия оценки работоспособности.

При отрицательном итоге испытаний, то есть в случае обнаружения критических повреждений на различных этапах испытаний, с помощью контрольных испытаний определяются материаловедческие и конструктивные недостатки полимерных изоляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процедура реализации многофакторных ускоренных испытаний полимерных изоляторов различного назначения на старение до настоящего времени в России детально не прорабатывалась.

Поэтому проведение в России многофакторных ускоренных испытаний полимерных изоляторов на старение в соответствии с предлагаемой методикой, включающей механические усилия, электрическое напряжение и параметры климатических факторов различных климатических зон России, позволит с большей достоверностью делать заключения о возможности длительного сохранения работоспособного состояния полимерных изоляторов в районе эксплуатации, а также выявлять их материаловедческие и конструкторские недоработки.

Проведение многофакторных ускоренных испытаний полимерных изоляторов на старение в России (в соответствии с [18]) будет также способствовать получению данных о взаимозависимости результатов лабораторных испытаний и опыта эксплуатации, которая обусловливает возможное соотношение длительности испытаний и длительности эксплуатации полимерных изоляторов, то есть характеризует фактор ускорения.

Манипулируя предельными значениями воздействующих факторов, длительностями их воздействия и последовательностями чередования отдельных факторов при проведении ускоренных испытаний на старение полимерных изоляторов, возможно исследовать влияние указанных выше факторов на отдельные характеристики полимерных изоляторов, таких как адгезионная стойкость элементов конструкции полимерных изоляторов, гидрофобность оболочки, влияние загрязнений и т. п.

Следует отметить, что во многих странах наряду с реализацией лабораторных длительных испытаний полимерных изоляторов считается необходимым создание полевых испытательных станций для проведения исследований на открытом воздухе.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEC 61109-2008 Insulators for overhead lines — Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater then 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria.
2. IEC/TR 62730-2012 HV polymeric insulators for indoor and outdoor use tracking and erosion testing by wheel test and 5000 h test.
3. СТО 56947007-29.240.069-2011 Изоляторы подвесные для ВЛ 11-750 кВ. Методы испытаний. ОАО «ФСК ЕЭС».
4. ГОСТ 28856-90 Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные. Общие технические условия.
5. ГОСТ Р 52082-2003 Изоляторы полимерные опорные наружной установки на напряжение 6-220 кВ. Общие технические условия.
6. IEC 62217-2012 Polymeric HV insulators for indoor and outdoor use — General definitions, test methods and acceptance criteria.
7. Fini G.P. , Marrone G., PorrinoA. Results of accelerated ageing tests on components of electric system made with polymeric materials. CIGRE 1988 session, paper 15-07.
8. Satoshi Kobayashi, Yutaka Matsuzaki, Hiroshi Masuya et el., Development of Composite Insulators for Overhead Lines., Furukava Review, №19, 2000.
9. Xidong Liang, Zhenyu Li, Yu Yin et. el., Evaluation of Long-Term Ageing Performance of Silicone Rubber Composite Insulators Used for HVAC and HVDC Lines. CIGRE 2008, D1-207.
10. Schneider H.M. et al. Accelerated ageing facility for full scale 500 kV nonceramic insulators. 8th ISH, Yokohama, Aug. 23–27, 1993. Paper 47.07.
11. Assessing Long-Term Reliability of Polymeric Insulators & Arresters Used on Distribution Networks in Korea. INMR Q2-2007, 42–48.
12. ГОСТ 27905.1-88 Системы электрической изоляции электрооборудования. Оценка и классификация.
13. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. — Москва, 2000.
14. ГОСТ Р 55194-2012 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.
15. СТО 56947007-29.240.144-2013 Электрооборудование на напряжение свыше 3 кВ. Методы испытаний внешней изоляции в загрязненном состоянии.
16. IEC/TS 60815-3 (2008) Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 3: Polymer insulators for a.c. systems.
17. IEC 60507 (2013) Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems.
18. СТО 56947007-29.240.10.179-2014 Методические указания по проведению многофакторных ускоренных испытаний на старение изоляторов опорных полимерных на напряжение 110-220 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС».