

Надежность фарфоровых изоляторов

Изучение процессов, материалов и стандартов, применяемых производителями фарфоровых изоляторов с твердым сердечником, дает возможность сократить частоту их выхода из строя вследствие механического излома с пяти до двух случаев на 10 тыс. установленных изоляторов в год. Повышение надежности их эксплуатации позволит увеличить объем перевозок грузов на железных дорогах Индии с 800 млн. до 1100 млн. т к 2011–2012 гг.

Почти 28% протяженности (около 18 тыс. км) сети железных дорог Индии (IR), имеющих общую длину 63 332 км, электрифицировано на переменном токе напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц. Именно на этих линиях имеет место наиболее высокая интенсивность движения. В контактной сети используется около 2 млн. фарфоровых изоляторов с твердым сердечником. Выход из строя по какой-либо причине даже одного из них существенно сказывается на движении поездов. Ремонт в этом случае занимает не менее 3 ч, а потери в денежном выражении составляют в среднем около 100 тыс. рупий/ч.

В последние годы число отказов вследствие механического излома фарфорового сердечника составляло пять случаев на 10 тыс. установленных изоляторов в год, т. е. примерно три случая в день по сети. Ожидается, что проводимая с 2002 г. программа исследований позволит снизить ежегодный уровень механических повреждений, прогнозируемый для ныне устанавливаемых изоляторов, с пяти до двух на 10 тыс. изоляторов. Тогда этот показатель будет сопоставим с типичным значением для линий электропередачи — один случай на 10 тыс. изоляторов. Однако там выход изоляторов из строя вызван преимущественно перекрытием по поверхности, в то время как изоляторы контакт-

ной сети железных дорог подвержены сильной вибрации при прохождении токоприемников электроподвижного состава, и для них наиболее распространенным является механическое повреждение.

Изоляторы трех типов

На железных дорогах Индии используются фарфоровые изоляторы трех основных типов. Первые два обычно применяются при креплении контактной подвески к одиночной опоре с помощью консоли, состоящей из тяги, кронштейна и фиксатора, при этом изолятор тяги работает на растяжение, а изолятор кронштейна — на сжатие (рис. 1).

Изоляторы третьего типа, так называемые 9-тонные, как грузовые компенсаторы анкерной опоры устанавливаются на каждом конце анкерного участка протяженностью 1,5 км. Они должны выдерживать совместное действие сил натяжения в несущем тросе и контактных проводах. Такие изоляторы наиболее подвержены повреждениям. За 6 лет ежегодный уровень отказов, вызванных всеми возможными причинами, составил 16,6 случая на 10 тыс. изоляторов этого типа (табл. 1).

Согласно результатам испытаний собранных образцов анкерных изоляторов, от 40 до 45% из них вышли из строя при силе натяже-

ния ниже 77 кН, или при 70% предельного значения силы натяжения, равного 110 кН, из-за чего изолятор и получил название 9-тонного (9 т соответствуют 88,2 кН). Номинальное значение силы натяжения для стандартных анкерных участков контактной сети длиной 1,5 км составляет 20 кН. В настоящее время все новые 9-тонные изоляторы испытываются при силе натяжения, равной 77 кН, что исключает возможность установки изоляторов, выдерживающих силу натяжения меньшей величины.

Исследования вышедших из строя изоляторов, а также некоторых экземпляров из реально не использовавшихся партий изоляторов, предположительно подверженных отказам, позволили установить существенное значение фактора правильного выбора диаметра сердечника. Проверка около 300 образцов показала, что 64% вышедших из строя изоляторов кронштейнов и тяг имели диаметр сердечника менее 70 мм, при этом даже у некоторых анкерных изоляторов диаметр сердечника составлял всего 70 мм.



Рис. 1. Изоляторы кронштейна и тяги

Таблица 1

Отказы изоляторов по всем причинам за 6 лет

Виды изоляторов	Число отказов на 10 тыс. изоляторов в год
Изоляторы тяги	9,1
Изоляторы кронштейна	8,5
Анкерные изоляторы	16,6

Ранее выбор диаметра сердечника был прерогативой изготовителя, теперь в соответствии с новыми техническими требованиями минимальный диаметр сердечника изолятора кронштейна и тяги должен составлять 70 мм, анкерного изолятора — 82 мм.

Результаты проведенного анализа не связанных с внешними причинами отказов изоляторов трех указанных типов за 2000–2006 гг. представлены на рис. 2. Видно, что 52% отказов имеют место в течение первых 15 лет эксплуатации. Только 8% отказов происходят между 21 и 30 годами, однако в течение вдвое меньшего времени (5 лет между 31 и 35 годами) выходят из строя уже 19% изоляторов. Следует также отметить весьма значительное количество изоляторов, эксплуатирующихся более 45 лет.

В 2001 г. была разработана схема, позволяющая исключать партии изоляторов, предположительно подверженных отказам. В случае если в конкретной партии изделий происходят два или более отказа, ремонтному персоналу надлежит изъять еще пять изоляторов и провести их испытания на предельную прочность на растяжение. Результаты испытаний показали, что во многих случаях изоляторы выходили из строя при половине установленного значения силы натяжения, и, если индекс качества (отношение средней величины силы натяжения при испытаниях к установленной величине этой силы) оказывался меньше чем 1,45, рекомендовалось заменить всю партию.

Таблица 2

Химический состав двух зон образца № 3, %

Составляющие	Зона 1	Зона 2
Al ₂ O ₃	20	50
SiO ₂	70	40
K ₂ O (загрязнения)	7	3
Na ₂ O (загрязнения)	2	1
Fe ₂ O ₃ (загрязнения)	2	1

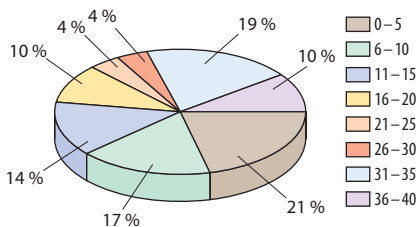


Рис. 2. Распределение по возрасту 2 млн. изоляторов, находящихся в эксплуатации на железных дорогах Индии

Однако численность изоляторов, предположительно подверженных отказам, продолжала расти и достигла 200 тыс. шт., т.е. почти 10% общего числа изоляторов, находящихся в эксплуатации. Ситуация осложнялась тем, что, как было установлено, на забракованные партии приходилось только 25% общего количества отказов и не было никакой гарантии, что изоляторы, используемые для замены изделий из подверженных отказам партий, будут работать долго и безотказно.

Углубленный анализ

Индийская организация по исследованиям, проектированию и стандартам в электротехнике (RDSO) провела углубленный анализ материала, из которого были выполнены вышедшие из строя изоляторы, с использованием рентгеновской дифрактометрии, энергодисперсионного рентгеновского анализа и сканирующего электронного микроскопа для определения фазового компонента, химического состава и микроструктуры.

С февраля 2002 по сентябрь 2004 г. были проведены испытания опытных образцов из партий, поставленных различными изготовителями. Среди всех подвергавшихся испытаниям изоляторов было отобрано пять образцов.

Образец № 1 не имел никаких повреждений в течение более 15 лет эксплуатации.

Образец № 2 вышел из строя через 8 лет по причине значительных

загрязняющих включений и недостаточной однородности кристаллической решетки материала.

Образец № 3 вышел из строя через 4 года вследствие значительных загрязнений и неоднородности материала несмотря на то, что содержание оксида алюминия в материале превышало 40%, а альфа-кварца было менее 5%. У данного образца была выявлена неоднородность кристаллической решетки при значительных различиях химического состава материала в двух зонах (табл. 2), что позволило сделать вывод о значительности роли, которую играет равномерность распределения фаз в кристаллической решетке.

Образцы № 4 и № 5 рано вышли из строя вследствие низкого содержания оксида алюминия и альфа-алюминия и большого содержания альфа-кварца и загрязнений.

В микроструктуре кристаллической решетки фарфора можно выделить две основные фазы — корунд и муллит. Первый более желателен, поскольку противодействует распространению трещин, которые вызывают неравномерное распределение механических напряжений. Содержание муллита до 4% благоприятно с точки зрения увеличения срока службы, но, если доля муллита становится больше, он способствует распространению трещин вследствие своей игольчатой структуры и сокращает срок службы изолятора. Состав обеих фаз зависит от процессов спекания и тепловой обработки.

Проблемы контроля качества

Результаты сравнительного анализа опытных образцов и проводившихся изготовителями приемочных испытаний с применением методов рентгеновской дифрактометрии, энергодисперсионного рентгеновского анализа и сканирующего электронного микроскопа более 240 изоляторов свиде-

тельствуют, что показатели, полученные для опытных образцов, обычно превосходят показатели для серийно выпускаемых изделий. Другой вывод заключается в том, что имеются значительные расхождения в составе материала изоляторов, поставляемых ИР разными изготовителями.

Имелись партии, в которых отмечалось низкое содержание оксида алюминия (не более 20%), содержание альфа-кварца превышало 10%, уровень загрязнений превышал 3%, а неоднородность кристаллической решетки — свыше 50%. Поскольку в технических требованиях ИР не были установлены предельные значения этих величин, такие изоляторы допускались к эксплуатации, но могли через какое-то время выйти из строя.

Чтобы разрешить эту ситуацию, был введен индекс качества (Quality Index — QI), который представляет собой отношение средней величины силы натяжения при испытаниях к установленной величине силы натяжения. В технических требованиях RDSO, принятых в 1999 г., было установлено значение QI, равное 1,45, для пяти выбранных образцов в соответствии со стандартом IEC 60591. Однако в дальнейшем было выявлено, что при этом уровне 7,35% изоляторов могут иметь механическую прочность меньше установленной.

Поэтому допустимое значение QI для пяти образцов изоляторов было увеличено до 2,5, что позволяет уменьшить долю изоляторов, имеющих недостаточную прочность, до 0,62%. Если значение QI поднять до 3,00, уровень отказов может быть сокращен до 0,13%. Однако при всем при этом необходим строгий контроль качества как в процессе производства, так и при выборе сырья, предполагающий контроль химического состава, однородности, наличия примесей, соблюдения технологии производства, обжига, а также диаметра сердечника.

Разработка новых технических требований

Выводы, сделанные на основе проводившейся с 2002 г. научной работы, отражены в новых технических требованиях, которые обязаны соблюдать поставщики фарфоровых изоляторов. Некоторых позиций относительно отдельных параметров (в частности, 1–5-й и 9-й) ранее в технических требованиях не было, другие изменены. В результате получен следующий перечень требований:

1. Содержание оксида алюминия — не менее 45% согласно результатам химического анализа или 40% согласно результатам энергодисперсионного рентгеновского анализа;
2. Содержание альфа-алюминия — не менее 30% по данным рентгеновской дифрактометрии;
3. Содержание загрязняющих примесей — до 2% по данным энергодисперсионного рентгеновского анализа и исследований с применением сканирующего электронного микроскопа (желательны наименьшие значения);
4. Вариация состава различных частей кристаллической решетки — до 20% по данным энергодисперсионного рентгеновского анализа и исследований с применением сканирующего электронного микроскопа;
5. Обязательное проведение механизированного теста на обнаружение трещин после испытаний температурного цикла;
6. Для анкерных изоляторов обязательные нагрузочные испытания при силе натяжения 110 кН;
7. Минимальный диаметр сердечника для изоляторов тяги и кронштейна — 70 мм, для анкерных изоляторов — 82 мм;
8. Значение индекса качества увеличено с 1,45 до 2,5;
9. Обязательные испытания с применением рентгеновской дифрактометрии, энергодисперсионного рентгеновского анализа и скани-

рующего электронного микроскопа в числе приемочных.

В результате ИР перешли на установку изоляторов, которые соответствуют указанным требованиям, при этом результаты испытаний опытных образцов и приемочных испытаний серийных изоляторов обнадеживают. Ожидается, что новые изоляторы будут иметь намного более длительный срок службы, а это позволит значительно повысить надежность движения поездов на электрифицированных линиях.

Предполагаемый экономический эффект от снижения количества отказов изоляторов с пяти до двух на 10 тыс. км в год оценивается в 6 млн. рупий, если считать, что расходы, вызванные закрытием движения из-за ремонта, составляют 100 тыс. рупий/ч. Ожидается также экономия за счет сокращения объема закупок и хранения на складе меньшего количества изоляторов.

В то же время будут продолжены исследования образцов вышедших из строя изоляторов с применением рентгеновской дифрактометрии, энергодисперсионного рентгеновского анализа и сканирующего электронного микроскопа, что должно помочь научно обоснованному прогнозированию увеличения срока службы. Ранее для проведения этих испытаний приходилось привлекать специалистов Центрального энергетического исследовательского института (г. Бангалор), приобретение ИР необходимого оборудования позволяет выполнять эту работу собственными силами.

Хотя данные исследования касаются изоляторов с твердым сердечником, которые используются на железных дорогах, электрифицированных на переменном токе напряжением 25 кВ, их результаты могут в равной степени быть полезны в других случаях применения подобных изоляторов.

R. N. Lal. Railway Gazette International, 2009, № 2, p. 42–44.