

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В СОВРЕМЕННОМ ЛИНЕЙНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Полимерные изоляторы для воздушных линий электропередачи многие энергетики по-прежнему считают своеобразным экспериментальным направлением. Со стороны эксплуатирующих компаний возникает большое количество вопросов, связанных с надежностью и долговечностью данного вида изоляторов. В статье рассказывается о современном уровне развития полимерной изоляции и опыте ее применения в российской энергетике.

Ключевые слова: полимерные изоляторы, стеклянные изоляторы, фарфоровые изоляторы



Рис. 1. Птицезащищенные изоляторы с устройством для защиты от загрязнений продуктами жизнедеятельности птиц



Рис. 2. Изоляторы-разрядники с птицезащищенными изоляторами, оснащенными устройствами грозозащиты ВЛ



Рис. 3. Тарельчатые гидрофобные изоляторы с кремнийорганическим покрытием



Рис. 4. Тарельчатые гидрофобные изоляторы, стеклополимерные с кремнийорганической оболочкой

В настоящее время существуют целые сегменты рынка, где активно применяется полимерная изоляция. Например, контактная сеть электрифицированных железных дорог, вдольтрассовые линии электропитания газо- и нефтепроводов и другие. Основная номенклатура изоляторов, применяемых в российской энергетике, выглядит следующим образом:

- изоляторы штыревые (применяются в сетях 6–35 кВ);
- изоляторы опорные линейные (применяются в сетях 6–35 кВ);
- подвесные полимерные изоляторы (применяются во всех классах напряжения до 500 кВ включительно);
- изолирующие траверсы (относительно новое направление, которое применяется в классах напряжения 6–220 кВ);
- изолирующие межфазные распорки (серийно изготавливаются в классах напряжения 6–500 кВ включительно);
- комплектные изолирующие подвески (применяются в классах напряжения 6–220 кВ);
- опорные подстанционные изоляторы (применяются для всех классов напряжения);
- шинные опоры (разработаны на базе опорных полимерных изоляторов, применяются в классах напряжения 6–220 кВ);
- изоляторы проходные (применяются в сетях 6–35 кВ).

На рубеже 2019–2020 гг. на отечественном рынке сравнялись объемы продаж (в денежном выражении) полимерных и стеклянных изоляторов, каждый из которых сегодня значительно превышает объем продаж фарфоровых изоляторов.



Такой результат стал итогом многолетнего процесса разработки и технологического совершенствования конструкций полимерных изоляторов, применения материалов более высокого качества и совершенствования отраслевой нормативно-технической документации как в части технических требований к изоляторам, так и в области методов их испытаний. Немаловажную роль сыграло снижение цены на полимерные изоляторы, которая сегодня ниже, чем цена аналогов из стекла.

Увеличению спроса на полимерные изоляторы способствовали и постоянное расширение номенклатуры, и ввод в эксплуатацию инновационных изделий, таких как:

- птицезащищенные изоляторы, в конструкцию которых интегрированы специальные устройства для защиты от загрязнений продуктами жизнедеятельности птиц (рис. 1). Благодаря этому не только сохраняются разрядные характеристики изоляторов, но также обеспечивается защита птиц от поражения электрическим током. До 25 % технологических нарушений в линиях электропередачи связано с воздействием животного мира;
- изоляторы-разрядники, в которых птицезащищенные изоляторы оснащены интегрированными в конструкцию устройствами грозозащиты ВЛ на базе

специальных ОПН или мультикамерных разрядников (рис. 2);

- тарельчатые гидрофобные изоляторы, которые подразделяются на гидрофобные с кремнийорганическим покрытием (рис. 3) и стеклополимерные с кремнийорганической оболочкой (рис. 4).

Стоит отметить, что гидрофобные изоляторы обладают очевидными преимуществами, некоторые из которых также характерны и для стеклополимерных изоляторов. Например, благодаря гидрофобному покрытию оболочки степень их загрязняемости значительно ниже, а разрядные характеристики в условиях загрязнения и увлажнения – выше. Благодаря этому исключается необходимость чистки и мойки гирлянд изоляторов, которая сопряжена не только с рядом неудобств, но также и необходимостью приобретения дополнительного технического оснащения, а именно специализированных машин (рис. 5). К тому же в результате применения кремнийорганической резины полимерные изоляторы приобретают стойкость к растрескиванию и эффектному «взрыву», что делает стрельбу по ним неинтересной, в результате чего снижается количество случаев вандализма.

Говоря о преимуществах стеклополимерных изоляторов с кремнийорганической оболочкой по сравнению с тарельчатыми изоляторами с гидрофобным покрытием, следует упомянуть, что в случае первых – процесс нанесения кремнийорганической оболочки из резины НТВ происходит в условиях прессформы, где есть возможность контролировать толщину этой оболочки, на сегодняшний день она составляет около 2–3 мм. Применение данной технологии позволяет обеспечить ряд преимуществ:

- прочное кремнийорганическое покрытие, стойкое к транспортировке, монтажу и эксплуатации в различных климатических условиях, которое является альтернативой очень тонкому и хрупкому покрытию у оболочки обычных гидрофобных изоляторов;
- дополнительная длина пути тока утечки и, как следствие – увеличенные разрядные характеристики. То есть в прессформе мы можем дополнительно формировать специальные ребра, увеличивающие длину пути утечки (ДПУ),
- повышенная стойкость к вандализму;



Рис. 5. Чистки и мойки гирлянд изоляторов с использованием специализированных машин

- конструкция позволяет легко идентифицировать поврежденный изолятор. Если разрушение стеклодетали произошло, то изоляционную деталь хорошо видно;

- важнейшим параметром является пониженная стоимость по сравнению с тарельчатыми гидрофобными изоляторами с кремнийорганическим покрытием. Ранее такие изоляторы изготавливались с применением материалов американского, немецкого производства, которые сегодня стали непомерно дорогими.

Преимущества применения полимерных изоляторов всех конструкций хорошо известны: отсутствие боя при перевозке, низкий уровень радиопомех, устойчивость к механическим повреждениям, а также улучшенные влагоразрядные характеристики в условиях загрязнения за счет гидрофобности оболочки. Масса полимерных изоляторов примерно в 7–10 раз ниже, чем у сте-

клянных, что в значительной степени снижает транспортные расходы, а также облегчает трудоемкость процесса монтажа на линиях электропередачи. Цена также значительно выгоднее – например, использование полимерных изоляторов на ВЛ 110 кВ обойдется в два раза дешевле по сравнению с гирляндой тарельчатых изоляторов.

Однако, следует признать, что еще несколько лет назад использование полимерных изоляторов (I и II поколений) ограничивалось рядом конструктивных недостатков, которые существенно сказывались на сроке службы и степени надежности изделий, что, как следствие, мешало активному внедрению полимерных изоляторов на электросетевых объектах.

Одна из проблем, негативно влияющая на качественные характеристики изоляторов I поколения – образование эрозии и трека (рис. 6) на внешней поверхности защитной оболочки.



Рис. 6. Эрозия и трек на внешней поверхности защитной оболочки изоляторов I поколения



Рис. 7. Дефекты на внешней поверхности защитной оболочки изоляторов I поколения



Рис. 8. Разрушения стеклопластикового сердечника под действием кислот (хрупкий излом)



Рис. 9. Механическое разрушение изолятора, связанное с нарушением герметичности



Рис. 10. Недостаточная герметичность границы раздела между оболочкой изолятора и оконцевателем

Причина возникновения таких дефектов – использование материалов на основе полиолефинов (полиэтиленов и полипропиленов), которые не обладали достаточно устойчивостью к ультрафиолетовому излучению (рис. 7). Во многом в связи с негативным опытом эксплуатации изоляторов I поколения сформировалось негативное представление в целом о полимерной изоляции, что, как следствие, мешало активному внедрению на рынок полимерных изоляторов последующих поколений даже несмотря на то, что технология изготовления была изменена. Применение кремнийорганической резины в моделях более поздних поколений исключило появление трека, что позволило обеспечить стойкость и долговечность защитной оболочки.

Еще одним существенным недостатком полимерных изоляторов первых двух поколений являлось возникновение так называемого хрупкого излома. Он происходил в результате разрушения стеклопластикового сердечника под действием кислот (рис. 8), которые появлялись при частичных разрядах в изоляторе из-за присутствия влаги. Развитие повреждения было напрямую связано с нарушением герметичности (рис. 9). При таком виде повреждения происходило механическое разрушение изолятора, которое сопровождалось падением провода на землю.

Дефект чаще всего был вызван недостаточной герметичностью границы раздела между оболочкой изолятора и оконцевателем (рис. 10). Этот недостаток относился в первую очередь к изоляторам I и II поколения, где



Рис. 11. В конструкции современных полимерных изоляторов III и IV поколений отсутствуют клеевые швы

сочленение оболочки и оконцевателя производилось вручную путем нанесения компаунда холодного отверждения. В конструкции современных полимерных изоляторов III и IV поколений полностью отсутствуют клеевые швы (рис. 11), защитная оболочка заходит на оконцеватели и вулканизируется на них, благодаря чему обеспечивается надежная герметизация изолятора, что в свою очередь положительно сказывается на его сроке службы.

Образование «дендритов» в стеклопластиковом стержне и треков на границе раздела «стержень – оболочка» – еще одна проблема, которой были подвержены первые поколения полимерных изоляторов (рис. 12). Вследствие плохой адгезии оболочки к стеклопластиковому стержню образовывались воздушные включения (рис. 13), из-за чего возникала внутренняя эрозия защитной оболочки вплоть до образования сквозных отверстий (первые изоляторы собирались пореберной сборкой вручную по так называемой «шашлычной» технологии).

В современных изоляторах нанесение защитной оболочки производится без участия человека в пресс формах под высоким давлением, благодаря чему проблема попадания воздуха под оболочку перестала быть актуальной.

Также немаловажным недостатком полимерных изоляторов I и II поколений являлась сложность обнаружения скрытых повреждений стеклопластикового стержня при опрессовании оконцевателей в процессе сборки изолятора (рис. 14). То есть, если такое повреждение происходило, то это



Рис. 12. Образование «дендритов» в стеклопластиковом стержне и трещин на границе раздела «стержень – оболочка»

провоцировало частичные разряды внутри изолятора и дальнейшее развитие этих трещин под воздействием механической нагрузки, под которой находится изолятор, что приводило к его полному разрушению.

В соответствии с существовавшей технологией сначала на стержень наносилась защитная оболочка, а затем надевались и опрессовывались оконцеватели. Проконтролировать состояние стеклопластикового стержня после опрессовки оконцевателей было невозможно.

В изоляторах III поколения сначала производится опрессовка оконцевателя на стеклопластиковом стержне, затем проводится визуальный и ультразвуковой контроль и только после этой проверки (при отсутствии повреждений) наносится в пресс-форме защитная кремнийорганическая оболочка.

Таким образом, для современных изоляторов III поколения характерны в первую очередь:

- наличие цельнолитой оболочки из кремнийорганической резины;
- надежная герметизация узла сопряжения: «оболочка-стержень-оконцеватель» благодаря заходу защитной оболочки на оконцеватели и полного исключения клеевых швов из конструкции изоляторов;
- исключение возможности неконтролируемого повреждения стеклопластикового стержня при опрессовании оконцевателей в процессе сборки изолятора.

В конструкции изоляторов III поколения имевшиеся проблемы были решены. Тем не менее, массовому применению изоляторов III поколения препятствовал ряд технических сложностей, выявленных в процессе эксплуатации. Например, проблема отыскания перекрытого или пробитого полимерного изолятора на ВЛ. Выявить такой изолятор по внешнему виду очень сложно. Сегодня для решения данной задачи успешно используются

индикаторы перекрытия полимерного изолятора. Они существуют на рынке и успешно эксплуатируются уже более пяти лет. Это механические устройства (рис. 15), которые показывают, что изолятор, на который они установлены, имел факт перекрытия. Контроль производится путем визуального осмотра состояния индикаторного элемента. В случае перекрытия изолятора он отсоединяется от изолятора путем «отстрела» или изменения положения, таким образом происходит индикация, что полимерный изолятор имел факт перекрытия по какой-либо причине.

Также, к сложностям использования полимерных изоляторов в сравнении с гирляндами стеклянных изоляторов можно отнести восприимчивость к вибрации. В изолирующих подвесках они повторяют колебания, которые происходят на проводе. Если у линии есть проблемы с виброзащитой, то накопление этих усталостных напряжений приводит к разрушению изолятора. Решением в данном случае стало применение изоляторов IV поколения типа ЛКМ (рис. 16) в



Рис. 15. Индикаторы перекрытия полимерного изолятора

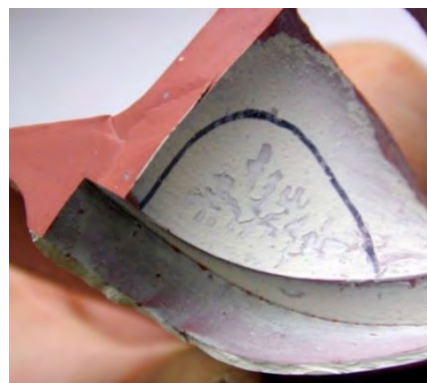


Рис. 13. Воздушные включения, образовавшиеся вследствие плохой адгезии оболочки к стеклопластиковому стержню



Рис. 14. Скрытые повреждения стеклопластикового стержня при опрессовании оконцевателей в процессе сборки изолятора

районах, подверженных частой и интенсивной вибрации, а также применение современных конструкций гасителей вибрации высокой эффективности.

Проблема оценки остаточного срока службы полимерных изоляторов также остается актуальной, в связи с чем возрастает трудоемкость проведения ремонтных работ и своевременной замены критически поврежденных изо-



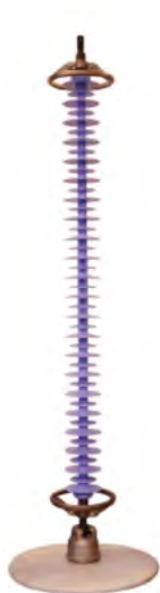


Рис. 16. Изолятор IV поколения типа ЛКМ

ляторов. Поэтому пока предлагается изоляторы с фактическим сроком эксплуатации, равным или превышающим предусмотренный действующими СТО ПАО «Россети» (40 лет), выводить из эксплуатации.

В 2022 году на рынке были представлены изоляторы типа ЛКМ, относящиеся к IV поколению, в которых отсутствуют вышеуказанные «слабые стороны» предшественников. Конструкция предусматривает возможность оценки состояния полимерных изоляторов, а также обеспечивает снижение воздействия вибрации и пляски.

Отличительные характеристики изоляторов ЛКМ:



Рис. 17. Индикатор состояния полимерного изолятора

- низкий уровень максимальных напряженностей поля в зоне нижнего оконцевателя благодаря специальной конструкции оконцевателя с нижним дополнительным экраном. В таблице 1 представлены рекомендуемые величины максимальных напряженностей поля от ведущих мировых экспертных организаций. Они определяют нормативы показателей напряженностей в трех зонах изолятора. (вдоль наружной поверхности оболочки; на границе трех сред: оконцеватель, воздух, оболочка; на поверхности экрана). Применение новой конструкции оконцевателя с введением дополнительного небольшого экрана и в системе с новым экраном самого изолятора позволило снизить напряженность поля, в каждой из зон изолятора (таблица 2);
- повышенная стойкость к воздействию вибрации. Как представлено в таблице 3, изоляторы ЛКМ почти в два раза более устойчивы к вибрации в сравнении с изоляторами III поколения. Дополнительное повышение устойчи-

вости изоляторов к вибрации обеспечивает специальный индикатор состояния полимерного изолятора (рис. 17), который, являясь шарнирным узлом, развязывает контур вибрации изолятора и снижает изгибающие усилия, воздействующие на него;

- индикация состояния полимерного изолятора. Она осуществляется с помощью специального индикатора, которым оснащается изолятор (рис. 17). Он разработан на базе серийно выпускаемых изделий – стеклянных тарельчатых изоляторов. Превышение напряжения на индикаторе выше заданного порога приводит к возникновению искрового разряда между электродами индикатора, вследствие чего возникает звуковой сигнал и радиоизлучение определенной силы и частоты, означающие, что изолятор вышел из строя. Данный разряд прослушивается в звуковом диапазоне или определяется посредством простейших приемников, которые при себе может иметь обслуживающий персонал ВЛ при ежегодном обязательном обходе. Также возможна дистанционная диагностика или проверка с помощью дронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно сделать следующее заключение: сложившееся у некоторых специалистов негативное отношение к полимерным изоляторам, основанное на недостатках первых двух поколений, является ошибочным в отношении современных моделей. Полимерные изоляторы IV поколения – это качественно новый вид изоляторов, применение которых обеспечивает стабильную и долговечную работу линии электропередачи. Расширение применения полимерных изоляторов последних поколений – одно из наиболее перспективных направлений для обеспечения эффективной работы электросетевых объектов всех классов напряжения:

- на ВЛ 6–220 кВ нет каких-либо ограничений для использования полимерных изоляторов;
- на ВЛ 330 кВ и выше целесообразно применять двухцепные изолирующие подвески из полимерных изоляторов с индикаторами состояния изоляции.

Материал подготовила Ассоциация «Электросети изоляция»

Таблица 1. Рекомендуемые величины максимальных напряженностей поля E_m , кВ/мм

| Наименование организации | Вдоль наружной поверхности оболочки | На границе трех сред «оконцеватель-оболочка-воздух» | На поверхности экрана |
|--|-------------------------------------|---|-----------------------|
| CIGRE brochure 284 | 0,6–1,0 | – | 1,6*–2,2 |
| EPRI (Electric Power Research Institute) | 0,45 | 0,35* | 2,1 |
| STRI (Sweden Testing Research Institute) | 0,4* | | 1,8 |

* Минимальное значение

Таблица 2. Максимальные напряженности поля изолятора IV поколения без индикатора, E_m , кВ/мм, ЛК 220 кВ по результатам расчетов

| Вдоль наружной поверхности оболочки | На границе трех сред «оконцеватель-оболочка-воздух» | На поверхности экрана | Примечание |
|-------------------------------------|---|-----------------------|--|
| 0,4 | 0,35 | 1,6 | Минимальные значения из максимальных, рекомендуемых по таблице 1 |
| 0,37 | 0,21 | 1,55 | Изолятор IV поколения без индикатора |

Таблица 3. Максимальные значения прогиба стержня полимерного изолятора, мм/м

| Наименование изолятора | Прогиб стержня полимерного изолятора | |
|------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| | Поддерживающая гирлянда | Натяжная гирлянда |
| ЛК 70/110 кВ | 0,9 | 7,5 |
| ЛКМ 70/110 кВ | 0,5 | 3,5 |