

**Ю.Н. ШУМИЛОВ**, докт. техн. наук проф., ГП «НИИВН», Славянск;  
**М.Ю. ШУМИЛОВ**, канд. техн. наук, инж., ГП «НИИВН», Славянск

### ПОВЫШЕНИЕ ВЛАГОРАЗРЯДНЫХ СВОЙСТВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

В работе описаны механизмы вулканизации герметиков, традиционно используемых для герметизации силовых узлов полимерных изоляторов. Проведенный теоретический и экспериментальный анализ возможности использования жидких силиконовых резин аддитивной вулканизации для улучшения герметизации силовых узлов полимерных изоляторов. Поданы рекомендации относительно применения данных резин при производстве полимерных изоляторов.

У роботі описані механізми вулканізації герметиків, традиційно використовуваних для герметизації силових вузлів полімерних ізоляторів. Проведений теоретичний і експериментальний аналіз можливості використання рідких силіконових гум аддитивної вулканізації для поліпшення герметизації силових вузлів полімерних ізоляторів. Подано рекомендації щодо застосування даних гум при виробництві полімерних ізоляторів.

The research describes mechanisms of curing of traditionally used sealants for sealing of polymer insulators' line assemblies. The theoretic and experimental analysis of possible usage of liquid silicon rubbers with additive curing for improvement of sealing of polymer insulators' line assemblies is made. Recommendations regarding application of such rubbers at manufacturing of polymer insulators are made.

Статистика повреждений полимерных изоляторов показывает, что значительное число повреждений вызвано недостаточной герметизацией силовых узлов, рис. 1.



Рис. 1 – Нарушение герметизации силового узла линейного полимерного изолятора типа ЛК

В настоящее время герметизация силовых узлов линейных изоляторов типа ЛК и железнодорожных изоляторов типов ПСК, НСК, ФСК и КСК осуществляется с помощью герметиков КЛТ-30 или ЭКП-102, вулканизирующихся при комнатной температуре. В состав указанных герметиков входят силиконовый низкомолекулярный каучук СКТН, наполнитель (титановые белила) и вулканизирующий агент (К-10С, метилтриацетоксисилан).

Отличительными свойствами указанных герметиков являются: простота технологии нанесения, поскольку они являются одноупаковочными; не требуют смешения перед нанесением; отверждаются при комнатной температуре. Они обладают высокими диэлектрическими свойствами ( $\rho_v = 10^{10} - 10^{12}$  Ом·см,  $E_{np} = 15 - 20$  кВ/мм) и высокой светоподостойкостью. К недостаткам следует отнести низкие разрушающие напряжения при растяжении, сопротивление раздиру и отслаиванию. Отслаивание от металлов, особенно в присутствии влаги, является их главным недостатком. Этот недостаток выявляется, прежде всего, при стандартных испытаниях изоляторов по показателю «Стойкость к проникновению влаги» (п. 5.1.8, СОУ МПЕ 40.1.51.301:2004 «Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные. Общие технические условия» [1]) или «Испытание погружением в воду» (согласно требованиям п. 5.1.3.3 МЭК 61109:1992 «Полимерные изоляторы для воздушных линий электропередач с номинальным напряжением свыше 1000 В – Определения, методы испытаний и приемочные критерии» [2]).

Этот вид испытаний предусматривает погружение изоляторов на 42 часа в сосуд с кипящей деионизированной водой, содержащей 0,1 % NaCl, с последующим испытанием изоляторов импульсным напряжением с крутым фронтом волны. На рис. 2 показан результат воздействия импульсных напряжений с крутым фронтом волны.



Рис.2 – Изолятор типа ПСК 120-3,3-7, пробитый импульсным напряжением с крутым фронтом волны

Кроме этого, при снятии с изоляторов оконцевателей отчетливо просматриваются следы ржавчины на внутренней поверхности раструба оконцевателя.

Следы ржавчины в раструбах оконцевателей обнаруживаются и при испытании изоляторов в загрязненном и увлажненном состоянии. После кипячения наблюдается существенный рост токов утечки через стеклопластиковый стержень, а изоляторы при воздействии переменного напряжения  $0,8 \cdot U_{сxp}$  начинают нагреваться. Все это указывает на недостаточную герметизацию силовых узлов при использовании герметиков КЛТ и ЭКП.

Поставленная в работе задача улучшения эксплуатационных свойств полимерных изоляторов вызвала необходимость проведения анализа влияния состава герметиков, механизма их отверждения и используемой технологии на качество герметизации.

Известно [3, 4], что отверждение герметиков КЛТ-30 и ЭКП-102 осуществляется с помощью катализатора К-10С при комнатной температуре в присутствии влаги воздуха. Катализатор К-10С (метилтриацетоксисилан) имеет кислую реакцию, т.к. при соприкосновении с влагой воздуха быстро гидролизуетсся с образованием уксусной кислоты. Она же в больших количествах выделяется при отверждении каучука СКТН в результате присоединения атомов водорода гидроксильных групп каучука к кис-лотным остаткам катализатора.

Вулканизация протекает только в присутствии влаги воздуха. При этом прежде происходит гидролиз ацетатных групп, и затем конденсация молекул с помощью сшивающих агентов, содержащих три функциональные группы, в результате чего возрастает молекулярная масса. Выделяющаяся уксусная кислота, имеющая характерный запах, улетучивается из системы.

Агрессивная концентрированная уксусная кислота, как показали испытания, вызывает коррозионное повреждение углеродистой стали. Выделение кислоты также сопровождается усадкой герметика. Усадка герметика и коррозия стали являются главными причинами недостаточной адгезионной прочности соединения металла с герметиком, что проявляется в отслаивании герметика от металла и проникновении влаги к стеклопластиковому стержню и границе раздела «стеклопластик – резина».

Попытка применения других катализаторов отверждения каучука СКТН, не образующих уксусную кислоту, не дали положительных результатов.

Так, применение хорошо известного катализатора К-18 (тетраэтоксисилан)

существенно усложнило технологию герметизации, увеличило время отверждения и не улучшило качества изоляторов. Усложнение техноло-

гии заключалось в том, что герметики с катализатором К-18 являются двухкомпонентными и требуют смешения перед нанесением.

Реакция вулканизации протекает очень медленно, поэтому она требует ускорения соответствующими катализаторами кислого или щелочного характера. Такими являются соли металлов или металлоорганических соединений: Sn, Pb, Ti, Zn. В основном применяется октоат олова ( $\text{Sn}(\text{OOC}_7\text{H}_{15})_2$ ).

Реакция отверждения с катализатором К-18 также сопровождается выделением побочного продукта (в данном случае спирта) и, как следствие, усадкой герметика. Кроме этого, применение герметика с катализатором К-18 требует предварительно грунтовки поверхности металлов.

Приведенный выше анализ механизмов отверждения герметиков показал, что герметизация изоляторов должна осуществляться веществами, отверждение которых происходит без усадки и без выделения побочных продуктов.

Для проверки этой гипотезы был проведен поиск соответствующих материалов и проведены эксперименты на изоляторах герметизированных выбранными материалами.

Поиск таких материалов привел к группе жидких силиконовых резин аддитивной вулканизации, осуществляемой при комнатной температуре. Эта группа материалов состоит из полидиметилсилоксановых каучуков с концевыми винильными группами и вулканизирующим веществом в виде водород-функциональных силоксанов. Вулканизация происходит с помощью платинового катализатора при комнатной температуре по схеме аддитивной сшивки и быстро ускоряется при возрастании температуры, при этом вулканизация осуществляется без выделения побочных продуктов и, следовательно, без усадки.

Испытания жидких резин для герметизации силовых узлов проводились на изоляторах ФСК 120-6-3,3-7-Ц.

Технология силовых узлов с помощью жидких резин состоит из следующих операций:

1. Снятие цинкового покрытия с поверхности силового узла оконцевателя (на токарном станке), на которую будет наноситься герметизирующий состав.

2. Обезжиривание герметизируемых поверхностей силового узла изолятора ацетоном или спиртово-ацетоновой смесью.

3. Нанесение грунтовки на очищенную стальную поверхность оконцевателя с последующей выдержкой в сушильном шкафу при температуре 100 – 130 °С.

4. Опрессовка остывшего после термообработки оконцевателя на изоляционную деталь полимерного изолятора.

5. Смешение двух компонент жидкой резины в строго нормированной пропорции.

6. Нанесение смещенной жидкой резины на силовой узел изолятора с помощью медицинского шприца или другого специального инструмента.

Макеты изоляторов, силовые узлы которых были герметизированы по указанной выше технологии с помощью силиконовых жидких резин, успешно выдержали испытания на соответствие требованиям п. 5.1.3.3 ИЕС 61109:1992 «Испытание погружением в воду» с последующим испытанием изоляторов импульсным напряжением с крутым фронтом волны, а также испытанием напряжением промышленной частоты, равным  $0,8 \cdot U_{свр}$  в течение 30 мин. Препарирование силовых узлов испытанных макетов показало отсутствие отслоений вулканизированной жидкой резины от стальной поверхности оконцевателей и полное отсутствие следов ржавчины.

Для подтверждения целесообразности применения новых материалов для герметизации силовых узлов были проведены сравнительные испытания изоляторов типа НСК 120-3,3-7-Ц и ФСК 120-6-3,3-7-Ц, часть из которых была выполнена с применением герметика ЭКП-102 Э, а остальные - с жидкой силиконовой резиной. Изоляторы были подвергнуты кипячению в течение 42 ч в 0,1 % растворе NaCl («Испытание погружением в воду» согласно ИЕС 61109) с последующим испытанием импульсным напряжением с крутым фронтом волны 1000 – 1100 кВ/мкс. Согласно требованиям ИЕС 61109 каждый изолятор после кипячения должен выдерживать перекрытия 25 импульсами положительной и 25 импульсами отрицательной полярности без пробоя. Результаты испытаний опытных изоляторов приведены табл. 1 и рис. 3.

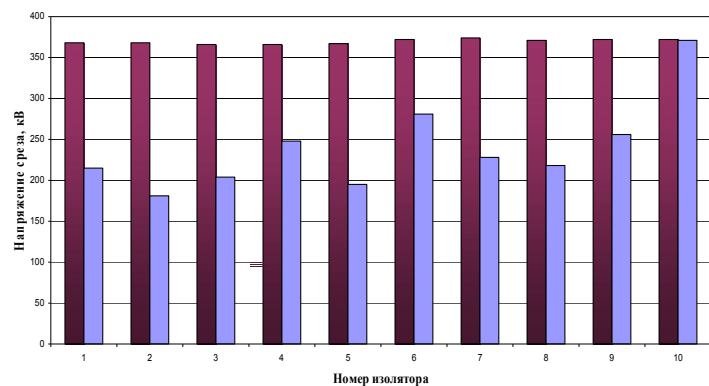


Рис. 3. - Импульсная электрическая прочность полимерных изоляторов НСК 120-3,3-7-Ц и ФСК 120-6-3,3-7-Ц с герметизацией силовых узлов герметиком ЭКП-102 Э и жидкой силиконовой резиной:

- герметизация изолятора с помощью жидкой силиконовой резины;
- герметизация изолятора с помощью герметика ЭКП-102 Э.

Таблица 1 – Результаты испытания полимерных изоляторов НСК 120-3,3-7-Ц и ФСК 120-6-3,3-7-Ц импульсным напряжением с крутым фронтом волны после кипячения

Тип изолятора	Герметизирующий материал	№ изолятора	Напряжение среза, кВ		Результат воздействия на изолятор испытательного напряжения		
			«+» полярность	«-» полярность			
НСК 120-3,3-7-Ц	Герметик ЭКП- 102 Э	1	215	-	Пробой на 8-м импульсе положительной полярности		
		2	364	181	Пробой на 2-м импульсе отрицательной полярности		
		3	365	204	Пробой на 10-м импульсе отрицательной полярности		
		4	248	-	Пробой на 2-м импульсе положительной полярности		
		5	195	-	Пробой на 9-м импульсе положительной полярности		
		ФСК 120-6-3,3-7-Ц		6	281	-	Пробой на 5-м импульсе положительной полярности
				7	370	228	Пробой на 12-м импульсе отрицательной полярности
				8	367	218	Пробой на 7-м импульсе отрицательной полярности
				9	256	-	Пробой на 2-м импульсе положительной полярности
				10	371	380	перекрытие изолятора
НСК 120-3,3-7-Ц	Жидкая резина	1.1	368	369	перекрытие изолятора		
		2.1	368	371	то же		
		3.1	366	369	- // -		
		4.1	366	370	- // -		
		5.1	367	368	- // -		
		ФСК 120-6-3,3-7-Ц		6.1	372	376	- // -
				7.1	374	376	- // -
				8.1	371	380	- // -
				9.1	372	376	- // -
				10.1	372	378	- // -

В результате проведенных испытаний после кипячения была подтверждена высокая импульсная электрическая прочность изоляторов, герметизация силовых узлов которых была выполнена жидкой силиконовой резиной аддитивной вулканизации. Изоляторы выдержали по 25 перекрытий импульсным напряжением с крутым фронтом волны положи-

тельной и 25 перекрытий отрицательной полярности с амплитудой, в среднем, 365 – 375 кВ. Те же изоляторы, в которых герметизация силовых узлов была выполнена с помощью герметика ЭКП-102 Э, в большинстве, прорвались: 5 шт. на импульсах положительной полярности (напряжение среза 215 – 256 кВ); 4 шт. на импульсах отрицательной полярности (напряжение среза 181 – 228 кВ). И лишь 1 изолятор выдержал по 25 перекрытий импульсами положительной и отрицательной полярности. Таким образом, результаты проведенных испытаний (табл. 1, рис. 3) показали, что импульсная электрическая прочность изоляторов с герметизацией силового узла, выполненная с помощью жидкой силиконовой резины аддитивной вулканизации более чем на 30 % выше изоляторов с герметизацией, выполненной с применением герметика ЭКП 102 Э.

Полимерные изоляторы НСК 120-3,3-7-Ц и ФСК 120-6-3,3-7-Ц, герметизация силовых узлов которых была выполнена с помощью жидкой силиконовой резины, после кипячения и перекрытия импульсным напряжением дополнительно были испытаны напряжением промышленной частоты, равным 80 % сухоразрядного напряжения с выдержкой в течение 30 мин. Увеличение токов течи во время испытания напряжением промышленной частоты и нагрева изоляционных элементов изоляторов выявлено не было. Препарирование силовых узлов испытанных изоляторов ФСК 120-6-3,3-7-Ц показало отсутствие отслоений вулканизированной жидкой резины от стальной поверхности оконцевателей и полное отсутствие следов ржавчины.

Результаты, представленные в табл. 1 и рис. 3, подтверждают гипотезу о том, что применение кремнийорганических резин аддитивной вулканизации для изготовления полимерных изоляторов повышает их герметичность и, как следствие, электрическую прочность при комплексном воздействии климатических факторов и сильного электрического поля.

Полученные результаты проведенных исследований могут также использоваться при изготовлении наружной полимерной изоляции другого высоковольтного электротехнического оборудования: ограничителей перенапряжений, опорных и проходных изоляторов, трансформаторов тока и напряжения.

**Список литературы:** 1. СОУ МПЕ 40.1.51.301:2004 Ізолятори лінійні підвісні стрижньові полімерні. Загальні технічні умови. Введ. 31.12.2004 до 2014. – К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2005. – 42 с. – УДК 621.315.624-036 (083.74). 2. Standart IEC 61109-92 Composite insulator for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria”. – 30 с. 3. *Смыслова Р.А.* Справочное пособие по герметизирующим материалам на основе каучуков / *Р.А.Смыслова, С.В.Котлярова.* – М.: Химия, 1976. – 72 с. УДК 62-762:678.074. 4. *Лабутин А.Л.* Антикоррозионные и герметизирующие материалы на основе синтетических каучуков / *Лабутин А.Л.* – Л.: Химия, 1982. – 214 с.

*Поступила в редколлегию 03.11.2010*