



# Современные сухие измерительные трансформаторы наружной установки напряжением 35 кВ

Компания АББ – лидер украинского рынка по поставкам сухих измерительных трансформаторов (ИТ) напряжением 35 кВ. Преимущества электрооборудования с сухой изоляцией перед маслонаполненным очевидны и хорошо известны специалистам. В данной статье описаны основные этапы развития технологии литой полимерной изоляции, применяемой в электроаппаратах наружной установки, приведен пример разработки последнего поколения ИТ.

## Эволюция изоляционных полимерных материалов для изготовления ИТ

В конце 1960-х наиболее распространенным материалом для изготовления ИТ среднего напряжения (до 40 кВ) был бутылкаучук. Он и по сей день используется некоторыми производителями, однако технологическая необходимость применения высоких давлений (более 15 атм) в процессе полимеризации (рис. 1) затрудняла сохранение точных размеров конструкции сердечника и обмоток, поэтому разработчики продолжали поиски других материалов.

Отличной альтернативой оказались компаунды на основе эпоксидных смол. Их исходные компоненты удобно транспортировать, измерять и смешивать, а полимеризация происходит под вакуумом либо под относительно небольшим избыточным давлением (2...3 Атм), что позволяет выдержать геометрию конструкции и производить изделия стабильного качества.

Циклоалифатическая эпоксидная смола (Cycloaliphatic Epoxy – СЕР) впервые была применена для наружной изоляции в конце 1970-х. Основанием послужили высокая стойкость к коррозии, трекинг-эрозии, а также отличные механические и диэлектрические свойства. СЕР и сегодня остается одним из самых популярных изоляционных материалов.

В 1980-х были также разработаны полиуретановые эластомеры для электрооборудования наружной установки. Их основное преимущество по сравнению с эпоксидными компаундами – более короткий технологический цикл, недостаток – относительно низкая максимально допустимая рабочая температура.

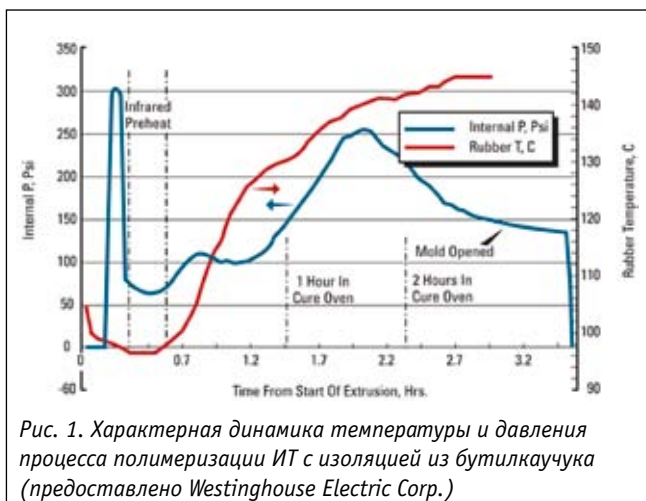


Рис. 1. Характерная динамика температуры и давления процесса полимеризации ИТ с изоляцией из бутылкаучука (предоставлено Westinghouse Electric Corp.)

## Инновационная наружная изоляция

Современные изоляционные материалы для оборудования наружной установки имеют гидрофобные поверхности, обладающие эффектом самоочистки.

В случае применения гидрофильных (смачиваемых) поверхностей, собранные на них растворимые загрязнения растворяются в воде, образуя проводящие электролитические пленки, которые провоцируют на высыхающих промежутках поверхностные разряды. Если изолятор – полимер, разряды могут вызвать эрозию поверхности и образование проводящих дорожек («треков»). На гидрофобных (несмачиваемых) поверхностях вода собирается в капли, которые скатываясь вниз, смывают накопившиеся загрязнения. Вода не способна образовать пленку, и риск поверхностных разрядов снижается. Таким образом, гидрофобная изоляция увеличивает срок службы оборудования и его надежность. Примером материала с высокими гидрофобными свойствами служит силиконовая резина, которая в настоящее время широко применяется в оборудовании наружной установки<sup>1</sup>.

В начале 2000-х на рынке появилось оборудование наружной установки с гидрофобной изоляцией на основе эпоксидного компаунда – НСЕР<sup>2</sup> (рис. 2). При разработке этого материала была решена задача сохранения основных характеристик СЕР с приданием его поверхности гидрофобных свойств, сохраняющихся при длительном воздействии окружающей среды.



Рис. 2. Каплеобразование на вертикальной поверхности изолятора из НСЕР после 2 лет эксплуатации (Kitty Hawk, NC, USA) – свидетельство сохранности гидрофобных свойств в условиях морского климата

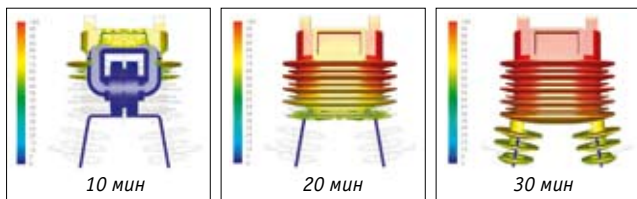


Рис. 3. Визуализация процесса реактивного литья трансформатора напряжения наружной установки

**Передовые методы проектирования**

Создание конкурентного и надежного электрооборудования возможно только при использовании передовых материалов и методов конструирования. Данный подход был принят компанией АББ при разработке нового поколения ИТ наружной установки.

Современные средства проектирования позволяют конструкторам уменьшить зависимость от дорогостоящих и длительных испытаний натуральных моделей-прототипов или вообще обойтись без них.

Разработка изделий из терморезистивного полимера проходит в два этапа:

- расчет электрической части;
- моделирование процесса формовки (заливки формы, процессов отверждения и доотверждения).

На первом этапе выполняют трехмерный компьютерный расчет электрического поля по поверхности и внутри корпуса из литой изоляции. Варьируя геометрию конструкции и диэлектрические промежутки, выбирают распределение поля с минимальными уровнями напряженности.

На втором этапе моделирования формовки используются методы, разработанные корпоративным исследовательским подразделением АББ в рамках проекта RAMZES<sup>3</sup>.

RAMZES – средство трехмерного компьютерного моделирования важнейших этапов процесса: заливки и гелеобразования. Полученные с его помощью данные используются при разработке самой формы и определении ключевых параметров процесса, таких как температура компаунда, формы и закладных деталей, давление, положение питателей. Эта информация позволяет избежать характерных технологических проблем – преждевременного гелеобразования, появления расслоений и пустот.

В моделировании учитываются все аспекты: подача материала, полимеризация, химическая и термическая усадка, теплообмен и механические напряжения. Программа позволяет визуализировать динамику распределения температур и процесса отверждения (рис. 3), что позволяет выявить области, в которых возможен недолив формы, и скорректировать положение питателей.

Таким образом, варьируя перечисленные параметры, можно получить минимальные уровни механических напряжений, обеспечивающие устойчивость изделия к растрескиванию.

<sup>1</sup> В силу своей высокой эластичности силиконовая резина не может применяться в ИТ среднего напряжения, современная концепция которых предполагает несение корпусом из полимерного материала механических нагрузок.

<sup>2</sup> Hydrophobic CER.

<sup>3</sup> ReActive Molding ZERo-defects Solution – метод бездефектного реактивного литья.

<sup>4</sup> Automatic Pressure Gelation.



Рис. 4. Установки APG, завод ABB s.r.o. (Brno, Czech Republic)



Рис. 5. Установка подготовки компаунда, завод ABB s.r.o. (Brno, Czech Republic)

**Современные технологии изготовления**

Самый лучший материал и конструкция не гарантируют надежной длительной работы оборудования без соответствующей технологии производства, обеспечивающей управляемость процесса и повторяемость результатов.

Первые технологии литья эпоксидных материалов широко использовали простое вакуумирование формы. Технологический цикл (заливка формы, полимеризация и извлечение) составлял несколько часов. В 1980-х была внедрена технология литья под давлением в предварительно разогретую форму (APG<sup>4</sup>), позволяющая снизить время цикла до 90 мин и менее (рис. 4). Сегодня преимущества APG общепризнаны.

Таким образом, современная технология производства ИТ включает установку APG совместно с системой подготовки и подачи материала, в которой компоненты компаунда могут смешиваться в требуемых пропорциях, обеспечивая оптимальные свойства смеси на стадии заливки, пропитки и полимеризации (рис. 5). Результатом является высокая стабильность качества продукции.

**Заключение**

Новое поколение ИТ компании АББ отражает общую тенденцию внедрения технологических инноваций. Производители все больше внимания уделяют долговечности материалов и продуктов для наружной установки.

Продукция с использованием HСЕР завоевывает все большее признание благодаря стойкости к агрессивным внешним факторам при сохранении отличных диэлектрических и механических свойств. На практике это означает длительный срок эксплуатации, снижение стоимости обслуживания и аварийности.

*Текст: Hoan Le, сотрудник подразделения ABB Medium Voltage (Pinetops, NC, USA), автор нескольких патентов и изобретений в области электроизоляционных систем, член IEEE*

*Слава Велес,  
менеджер по продукции АББ Лтд  
г. Киев, б-р И. Лепсе, 4  
тел. (044) 495 2211  
факс (044) 495 2210*

