

# РАЗРАБОТКА И ПОСТАНОВКА НА СЕРИЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ С ТВЕРДОЙ ВНУТРЕННЕЙ PIR-ИЗОЛЯЦИЕЙ НА КЛАССЫ НАПРЯЖЕНИЯ 110-220 кВ В ПЕРИОД 2002-2005 гг.

**110 лет**  
в электроэнергетике

Закрытое акционерное общество «Московский завод «Изолятор» им. А. Баркова» (ЗАО «Мосизолятор»), которое в 2006 г. отмечает свое 110-летие, широко известно в нашей стране и за рубежом как одно из старейших предприятий электротехнической промышленности России. Завод выпускает высоковольтные вводы на классы напряжения 35-1150 кВ переменного тока. Высоковольтный ввод является важным элементом электрооборудования электростанций и подстанций и в значительной мере определяет надежность работы силового трансформатора, а, следовательно, бесперебойность электроснабжения населения и объектов народного хозяйства.

После разделения в начале 90-х годов единой энергетической системы СССР на национальные энергетические компании произошел значительный спад в объемах производства и техническом уровне продукции, выпускаемой отраслью. В результате на рынке высоковольтных вводов России и стран СНГ, который ранее монополично занимал завод «Мосизолятор», резко обострилась конкуренция между производителями вводов на различные классы напряжения. В сложившейся ситуации перед предприятием встала проблема сохранения и развития своих позиций на внутреннем и международном рынках высоковольтных вводов с упором, в первую очередь, на новые высокотехнологичные и высоконадежные в эксплуатации изделия. Возникшая проблема была решена путем разработки и запуска в производство вводов принципиально новых конструкций и технологий, ранее не выпускавшихся в России.

Славинский А.Э., докт. техн. наук, Генеральный директор,  
Кассихин С.Д., Кирпичев А.Е., Климашевский И.П.,  
Никитин Ю.В., Сипилкин К.Г., Устинов В.Н., Шорников А.С.  
ЗАО «Мосизолятор»  
Львов М.Ю., канд. техн. наук, РАО «ЕЭС России»

Мировой электроэнергетической промышленностью выпускаются высоковольтные вводы с различными типами изоляции, основные из которых приведены в таблице.

Важнейшей частью любого высоковольтного ввода является внутренняя изоляция, качество которой определяет его надежность и внутренний ресурс.

В настоящее время несколько сот тысяч вводов, находящихся в эксплуатации в российских энергосистемах, это вводы с бумажномасляной изоляцией (БМИ). Почти монопольное положение БМИ во вводах высокого напряжения обусловлено целым рядом достоинств этой изоляции. Прежде всего, это достаточно высокая электрическая прочность (кратковременная и длительная), относительно низкий уровень диэлектрических потерь. Вместе с тем, хорошо известны и существенные недостатки вводов с БМИ. С точки зрения эксплуатации, это относительно высокие издержки по обслуживанию вводов, контроль герметичности вводов и давления масла в них, периодический отбор масла для определения его характеристик, в том числе хроматографический анализ растворенных газов в масле. Самый главный недостаток это — взрыво- и пожароопасность.

Эксплуатация маслонаполненных вводов всегда связана с потенциальной опасностью пробоя ввода и возможной утечкой масла как из ввода, так и из трансформатора через поврежденный ввод. Пробой БМИ или перекрытие бумажного остова во вводе, как правило, влекут за собой разрушение нижней фарфоровой крышки и последующий пожар на трансформаторе с тяжелыми экономическими и экологическими

Таблица  
Основные типы изоляции высоковольтных вводов

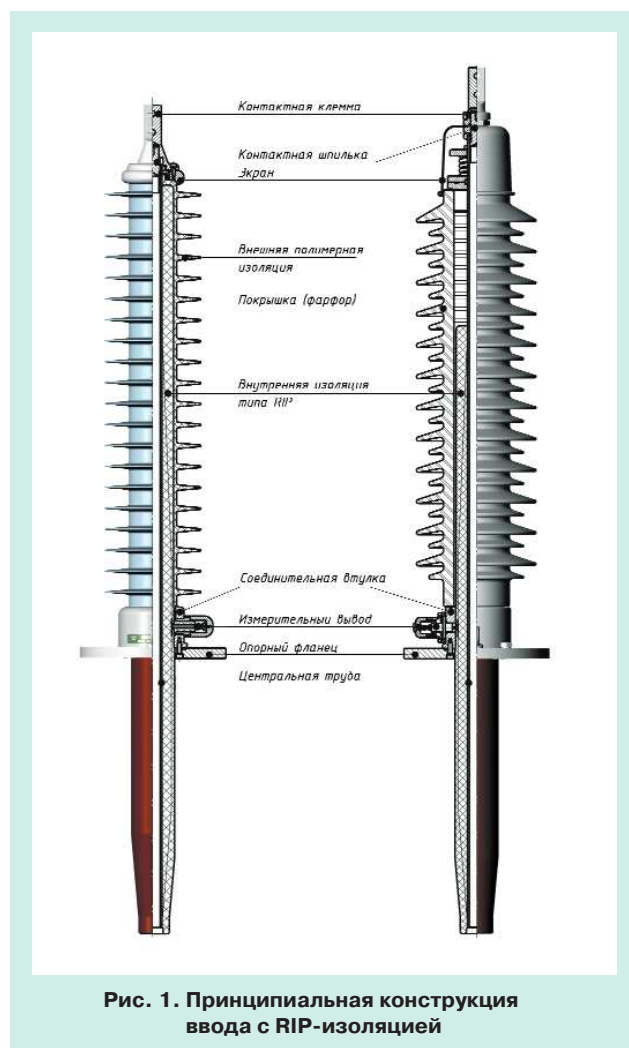
Наименование типа внутренней изоляции	Наименование (аббревиатура), соответствующая публикации МЭК IEC 60137 и зарубежным каталогам	Допустимая рабочая напряженность $E_{\text{раб.доп}}$ , кВ/мм
С бумажно-масляной изоляцией (БМИ)	Oil impregnated paper (OIP) бумага, пропитанная маслом	3,6-4,0
С бумажной изоляцией, покрытой смолой	Risin bounded paper (RBP) бумага, покрытая смолой	1,6-2,0
С бумажной изоляцией, пропитанной смолой	Risin impregnated paper (RIP) бумага, пропитанная смолой	4,0-6,0

последствиями. Реальна опасность загрязнения окружающей среды при вытекании трансформаторного масла из маслonaполненного оборудования — силовых трансформаторов, баковых масляных выключателей и др. Применение твердой RBP- и RIP-изоляции не приводит к таким тяжелым последствиям, как при вводах с БМИ, так как исключено вытекание масла через поврежденный ввод из силового трансформатора, содержащего его десятки тонн.

ЗАО «Мосизолятор» уже длительное время выпускает вводы на напряжения 35, 110 и 150 кВ с RBP-изоляцией. Однако у RBP-изоляции имеются и определенные недостатки, связанные с технологией ее производства. Значительная часть объема бумаги остается непропитанной, то есть содержит большое количество газовых включений. Это связано с тем, что смола, нанесенная на бумагу, при намотке проникает только в поверхностный слой (~ на 20 мкм) при общей толщине бумаги 70 мкм. Поэтому диэлектрические характеристики RBP-изоляции уступают соответствующим характеристикам БМИ, несмотря на значительно сниженные значения рабочих напряженностей электрического поля. Уровень частичных разрядов, характеризующий электрическую прочность изоляции, во вводах с RBP-изоляцией доходит до 250 пКл вместо 10 пКл во вводах с БМИ, что ограничивает область использования RBP-изоляции. Электрическая прочность RBP-изоляции оказывается недостаточной для создания вводов с высокими экономическими показателями на напряжение 220 кВ и более. Кроме того, внедрение на силовых трансформаторах новых методов диагностики предполагает проведение исследований трансформаторов под рабочим напряжением. Наличие на трансформаторе вводов с уровнем частичных разрядов до 250 пКл создает серьезные проблемы для таких диагностических работ.

Полное решение проблем, характерных для вводов с БМИ и RBP-изоляцией, может дать только применение твердой RIP-изоляции, имеющей низкий уровень частичных разрядов — до 5 пКл при рабочем напряжении и до 10 пКл при испытательном напряжении. При такой изоляции предварительно намотанный бумажный остов пропитывается эпоксидным компаундом под вакуумом, что исключает наличие в нем газовых включений. RIP-изоляция имеет

высокую термическую и механическую стойкость. С применением RIP-изоляции полностью решаются проблемы взрыво- и пожароопасности. Отпадает необходимость в нижней фарфоровой крышке, появляется возможность замены верхней фарфоровой крышки защитной оболочкой с ребрами из кремнийорганической резины. В результате значительно снижается масса ввода, уменьшаются его радиальные размеры. Отпадают проблемы герметизации конструкции, компенсации температурных изменений объема масла и т.д. Таким образом, в настоящее время наиболее совершенной и перспективной для трансформаторных, выключательных, реакторных и линейных вводов практически всех классов напряжения является RIP-изоляция. Принципиальная конструкция ввода с RIP-изоляцией изображена на рис. 1.



Основной конструктивной частью ввода с RIP-изоляцией служит его изоляционный остов, который изготавливается из специальной крепированной бумаги с конденсаторными обкладками из алюминиевой фольги. Обкладки служат для равномерного

распределения электрического поля и за счет их хорошей проводимости и геометрии расположения, определяемой расчетом, обеспечивают оптимальное распределение напряжения. Намотка остова на центральную трубу (алюминиевую или латунную) осуществляется на специальном намоточном станке с автоматическим контролем натяжения бумаги для получения заданной плотности.

Перед намоткой бумага должна быть высушена до необходимой влажности. Для обеспечения хорошей адгезии к компаунду комплекты конденсаторных обкладок готовятся в специальном помещении с нормированным климатом, уровень требований к которому выше, чем в сборочном цехе. Размеры и расположение обкладок задаются в конструкторской документации. После намотки остов помещается в сушильную печь и далее — в специальную герметичную камеру для пропитки под вакуумом. Пропитывающий компаунд на основе эпоксидной смолы готовится на специальной автоматической установке с компьютерным контролем состава, температуры, уровня вакуума и других параметров. После пропитки остов подвергается полимеризации при воздействии высокой температуры и давления по определенному технологическому режиму для уменьшения остаточных механических напряжений. Из-за разницы коэффициентов температурного расширения компаунда и металлических деталей возникают значительные механические напряжения при изменениях температуры. Причем большие значения получаются во вводах на большие токи и напряжения из-за увеличения габаритов. В RIP-изоляции, как в композиционном материале, на механическую прочность влияют соотношение бумага (наполнитель) — эпоксидная смола (пропитывающий состав).

На стадии разработки технологии получены патенты на изобретение и полезные модели по конструкции изоляционных остовов и установок для их изготовления. Выработаны технические требования к установкам для промышленного производства.

В процессе отработки технологии выбрано оптимальное соотношение между плотностью намотки и режимом пропитки (скорость, температура, давление). В результате оптимально подобранных соотношений состава компаунда, режимов пропитки и полимеризации получены высокие значения механической прочности — 1000 кг/см<sup>2</sup>. После полимеризации и отверждения изоляционному остову придается определенная форма путем токарной обработки. Особую важность имеет подбор состава компаунда и контроль за соблюдением технологии изготовления на всех стадиях производственного цикла. Именно подбор состава компаунда и технологические режимы, которые обрабатывались ЗАО «Мосизолятор» как расчетным, так и экспериментальным путем в течение 1996-2004 гг., являются гарантией сохранения высоких диэлектрических свойств RIP-изоляции в течение всего срока эксплуатации. Тщательный контроль за соблюдением технологических режимов в

процессе сушки, пропитки и полимеризации обеспечивает высокое качество получаемой изоляции в отношении уровня частичных разрядов и механических характеристик. Фактически измерения частичных разрядов на образцах RIP-изоляции, проведенные в МЭИ, показали, что при рабочем напряжении их уровень составил менее 0,5 пКл и не более 10 пКл вплоть до одноминутного испытательного напряжения, что выше норм, установленных требованиями МЭК 60137.

Ряд ведущих зарубежных фирм (ABB, HSP-Siemens, Bushing и др.) уже длительное время выпускают трансформаторные и линейные вводы с RIP-изоляцией на классы напряжения до 500 кВ. В России вводы с RIP-изоляцией собственного производства до 2004 г. не выпускались, осуществлялась только сборка вводов с изоляционными остовами импортного производства.

ЗАО «Мосизолятор» в 2002-2004 гг. разработана собственная технология промышленного производства RIP-изоляции. Для этого был решен ряд достаточно сложных научно-технических задач:

- определены оптимальные способы и режимы выполнения главных технологических операций (сушка, намотка, герметизация, заливка, полимеризация, механическая обработка);
- разработано, изготовлено и отлажено необходимое технологическое оборудование и оснастка;
- исследованы электрические, теплофизические и механические свойства RIP-изоляции, определены допустимые уровни эксплуатационных воздействий и разработаны методики соответствующих расчетов;
- разработаны методики (нормы) контрольных испытаний.

Практически все сведения о RIP-изоляции, необходимые для решения перечисленных задач, являются коммерческим секретом зарубежных фирм и не публикуются в открытых изданиях. К ним относятся, прежде всего, данные о допустимых значениях рабочих и испытательных напряженностей в RIP-изоляции, а также параметры главных технологических операций.

Определение допустимых значений рабочих напряженностей во внутренней изоляции ( $E_{\text{раб.доп}}$ ), то есть напряженностей, при которых с заданной вероятностью обеспечивается требуемый срок службы, — это одна из наиболее сложных проблем современной высоковольтной изоляционной техники. При необоснованно завышенных значениях рабочих напряженностей будет иметь место сокращение сроков службы, при заниженных значениях — неоправданное увеличение габаритов и продолжительности выполнения технологических операций.

Для достоверной оценки значений  $E_{\text{раб.доп}}$  и зависимости  $E_{\text{раб.доп}}$  от толщины изоляции проведены совместные исследования с Московским энергетическим институтом (Техническим университетом). Полученные формулы были использованы для электрического расчета, произведенного на компьютере по разработанной ЗАО «Мосизолятор» программе.

С помощью программы Cosmos-Works и по программам, разработанным специалистами СКТБ для высоковольтных вводов, были проведены также расчеты на механическую прочность с учетом электродинамических усилий и сейсмического воздействия и расчеты термической стойкости к токам короткого замыкания вводов с RIP-изоляцией.

Кроме этого, на натуральных образцах на напряжение 110 кВ проведены комплексные испытания на надежность, включающие в себя:

- воздействие термоциклов при нагреве токами перегрузки до  $(1,4-2)I_{ном}$  и естественном охлаждении до  $t_{окр}$ , при этом перепад температуры во внутренних областях изоляции, прилегающих к центральной трубе, достигал  $\Delta t \approx 100$  °С;

- испытания в климатической камере Всероссийского электротехнического института им. В.И. Ленина при воздействии циклов положительных и отрицательных температур от  $-60$  °С до  $+50$  °С и от  $-30$  °С до  $+90$  °С. До и после термоциклов проводились измерения уровня частичных разрядов, импульсные испытания и длительное воздействие напряжением промышленной частоты  $(1,3-3,0)U_{ф}$ . Некоторые образцы выдерживались под напряжением до пробоя основной изоляции. В этом случае образцы разрезались для определения места и характера пробоя. Эти испытания особенно важны для твердой изоляции, так как позволяют установить:

- монолитность изоляции как композиционной структуры «бумага + Al обкладки + компаунд»;

- отсутствие нарушения монолитности этой структуры изоляции в эксплуатации из-за внутренних механических напряжений, особенно при охлаждении до низких температур.

Полученные результаты позволяют сделать заключение о высокой надежности изоляционных остовов на 110-220 кВ, изготовленных по разработанной ЗАО «Мосизолятор» RIP-технологии. Необходимо отметить, что для твердой изоляции особенно важен учет масштабного фактора. Поэтому увеличение габаритов высоковольтных вводов на большие классы напряжений до 750 кВ требует дополнительных исследований на надежность и долговечность.

Принципиальная технологическая схема изготовления ввода с RIP-изоляцией приведена на рис. 2. Необходимо отметить, что технологическое оборудование и оснастка для процессов термовакuumной обработки, заливки, пропитки и полимеризации разработаны и изготовлены ЗАО «Мосизолятор» собственными силами. Автоматическое регулирование температурного режима в заливочных и полимеризационных камерах осуществляется с помощью промышленных программируемых контроллеров ULTRONIC/2 с системой визуального программирования MEGALOGiK и микропроцессорных регуляторов МИНИТЕРМ.300.

Вакуумная смесительная и дозировочная установка для подготовки компаунда была спроектирована и изготовлена по техническим требованиям



**Рис. 2. Принципиальная технологическая схема изготовления ввода с RIP-изоляцией**

ЗАО «Мосизолятор» одной из ведущих зарубежных фирм по производству установок для смолотлитья в среде вакуума для предприятий электронной и электротехнической промышленности.

Данная установка полностью автоматизирована и производит вакуумную дегазацию компонентов компаунда, их дозирование в заданном соотношении, смешение в стационарном миксере и подачу в заливочные камеры через многофорсуночную систему выпуска.

В 2002-2005 гг. разработана серия вводов для трансформаторов напряжения 110-220 кВ и токи 630, 800, 1000, 2500 А с внутренней RIP-изоляцией и двумя вариантами внешней изоляции: с фарфоровой крышкой и полимерной изоляцией. Вводы предназначены для работы в различных климатических условиях размещения по ГОСТ 15150-69.

Изоляционный остов всех типов вводов независимо от класса напряжения выполнен путем намотки

крепированной бумаги на центральную трубу и пропитки эпоксидным компаундом под вакуумом с последующей полимеризацией при воздействии температуры и давления. Однако технологические режимы намотки, пропитки и отверждения различаются в зависимости от габаритов изоляции. На твердый остов по принятой на заводе методике горячего прессования насажена соединительная втулка. На соединительную втулку устанавливается фарфоровая крышка либо производится полимеризация непосредственно на остов внешней кремнийорганической изоляции.

В верхней части вводов с фарфоровыми крышками имеется корпус с расположенными в нем пружинным узлом и узлом уплотнений. Пространство между фарфоровой крышкой и остовом RIP-изоляции заполняется трансформаторным маслом. Для контроля уровня масла во вводах на напряжение 220 кВ и выше в корпусе имеется оптический маслоуказатель. Следует отметить, что количество масла между твердым остовом и фарфоровой крышкой незначительно, и оно является хладагентом, то есть служит для предотвращения конденсации влаги и улучшения условий теплопередачи. Даже при разрушении верхней фарфоровой крышки ввод выдерживает действующее рабочее напряжение.

По сравнению с вводами с БМИ разработанные вводы с RIP-изоляцией имеют следующие преимущества.

- Снижена масса вводов по сравнению с заменяемыми аналогами в среднем в 2 раза за счет применения RIP-изоляции с более высокими значениями  $E_{\text{раб. доп.}}$  отсутствия нижней фарфоровой крышки, уменьшения диаметра верхней фарфоровой крышки
- Повышена механическая стойкость из-за отсутствия нижней фарфоровой крышки.
- Снижено потенциально опасное воздействие на окружающую среду за счет уменьшения массы трансформаторного масла внутри ввода в 6 раз по сравнению с аналогичными вводами с БМИ, а также исключено при повреждении ввода в эксплуатации вытекание и возгорание масла из самого силового трансформатора, содержащего его десятки тонн.
- За счет унификации конструкции вводов сокращена номенклатура применяемых деталей.
- Значительно снижены суммарные издержки в эксплуатации как следствие снижения затрат на обслуживание и ликвидацию последствий от аварий.
- Простота конструкции и подробно изложенные в руководстве по эксплуатации действия персонала обеспечивают экологическую безопасность вводов.
- Применение RIP-изоляции позволило снизить уровень частичных разрядов и, как следствие, установить нормативный срок службы вводов 30 лет.

Образцы установочных серий вводов указанных выше типов прошли квалификационные (приемочные) испытания в объеме, по методике и в условиях,

соответствующих требованиям межгосударственных и государственных стандартов, и выдержали их в полном объеме. Вводы принимались межведомственными комиссиями с участием представителей ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «Электросетьсервис», ОАО «ВНИИЭ», ГУП «ВЭИ им. В.И. Ленина», ОАО «НИЦ ВВА», ОАО «Мосэнерго», ОАО «Запорожтрансформатор», ОАО «Тольяттинский трансформатор». На типопредставителях всех вводов проведены сертификационные испытания в системе ГОСТ Р в аккредитованном Испытательном центре ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского».

На выставке «Электрические сети России», проходившей во Всероссийском выставочном центре (ВВЦ) в 2004 и 2005 гг., трансформаторным вводам с внутренней RIP-изоляцией и полимерной внешней изоляцией на напряжения 110 и 220 кВ присуждены II места в номинации «Электротехническое высоковольтное оборудование подстанций» с вручением Дипломов и серебряных медалей ВВЦ.

Наружный полимерный изолятор в качестве альтернативы фарфоровой крышки применяется давно и уже достаточно известен в мире. Обычно он представляет из себя стеклоэпоксидную трубу с нанесенными тем или иным способом резиновыми ребрами и двумя металлическими фланцами для крепления к соединительной втулке и верхнему фланцу ввода. Пространство между изоляционным остовом и полимерным изолятором в этом случае заполняется либо трансформаторным маслом, либо вспененным полиуретаном. Особенности технологии ЗАО «Мосизолятор» состоят в том, что при помощи специального активатора производится полимеризация наружной изоляции непосредственно на остов без какой бы то ни было границы раздела. Происходит как бы диффузия одного материала в поверхностный слой другого. Кроме того, изготовление наружной изоляции происходит целиком за один раз независимо от класса напряжения. При этом уникальная конструкция прессформ позволяет развернуть литниковый облой на смежных крыльях на 90° относительно друг друга, что делает практически невозможным возникновение скользящего разряда по наружной поверхности изоляции. Вводы с полимерной наружной изоляцией были подвергнуты всем возможным испытаниям по определению трекингеррозионной стойкости, стойкости к воспламенению, влагонепроницаемости, электрическим испытаниям границы раздела при помощи крутого грозового фронта и др. После всех проведенных испытаний состояние вводов осталось неизменным. Эти результаты и имеющийся опыт эксплуатации (до 6-ти лет) подтверждают успешное освоение передовой технологии нанесения полимерного оребрения.

Разработка и постановка на серийное производство высоковольтных вводов с RIP-изоляцией осуществлены ЗАО «Мосизолятор» целиком за счет собственных средств.

На заводе создан современный участок по производству изоляционных остовов с RIP-изоляцией с первоклассным технологическим оборудованием и уникальными передовыми технологиями. В общем объеме выпуска продукции вводы с RIP-изоляцией по количеству составили в 2004 г. — 2 %, в 2005 г. — 32 %, а в 2006 г. (план) — 56 %.

На рис. 3-5 представлены фотографии трансформаторного ввода 220 кВ с полимерным оребрением в высоковольтной лаборатории, вводов 220 кВ с фарфоровой покрывкой, установленных на трансформаторе в Мосэнерго, а также установки для подготовки и вакуумной заливки эпоксидного компаунда.



**Рис. 3. Трансформаторный ввод 220 кВ с полимерным оребрением в высоковольтной лаборатории**

В настоящее время высоковольтные вводы с твердой RIP-изоляцией являются наилучшим видом про-

ходных изоляторов как с точки зрения характеристик изоляции, надежности, так и с точки зрения эксплуатационных издержек и экологии.



**Рис. 4. Вводы 220 кВ с фарфоровой покрывкой**

Линейные вводы и вводы для масляных выключателей производства ЗАО «Мосизолятор» с полимерной внешней изоляцией пользуются повышенным спросом потребителей.



**Рис. 5. Установка для подготовки и вакуумной заливки эпоксидного компаунда**

Проводимое техническое перевооружение и развитие производства позволили увеличить количество и качество выпускаемой продукции, отвечающей мировым стандартам, а в некоторых случаях — для вводов с полимерной наружной изоляцией — и превзойти их.