

# RIN – изоляция. Исследования. Испытания. Перспективы

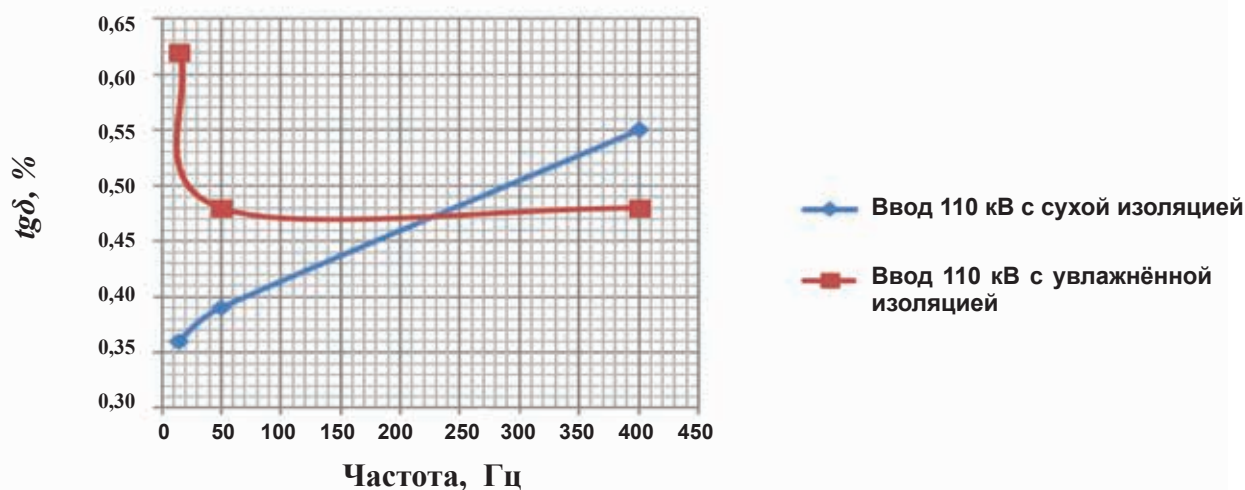
На сегодняшний день самым современным видом внутренней изоляции для высоковольтных вводов является твёрдая RIP-изоляция. О преимуществах данного вида изоляции перед другими видами известно давно, данной теме посвящено достаточно много статей. Однако даже RIP-изоляция не лишена недостатков. Основной из них – возможность увлажнения в процессе длительного хранения.

*Юрий НИКИТИН, главный конструктор компании «Изолятор»*

Увлажнение твёрдой изоляции вводов происходит при неправильном хранении и эксплуатации и приводит к уменьшению срока службы ввода, являясь одной из причин, связанной с его повреждаемостью.

В компании «Изолятор» проведена большая исследовательская работа по моделированию и изучению процесса увлажнения RIP-изоляции в сравнении с другим типом изоляции, а именно RIN-изоляцией (Resin Impregnated Nonwoven – пропитанный смолой нетканый материал). Исследования проводились методом диэлектрической спектроскопии, извест-

ной по публикациям в журнале INMR [1], с помощью прибора «DIRANA», производства компании «OMICRON». Как известно, зависимость  $\text{tg } \delta$  изоляции от частоты, особенно при частотах ниже 50 Гц, имеет повышенную чувствительность к увлажнению и старению [2]. На рис. 1 показаны зависимости  $\text{tg } \delta$  RIP-изоляции для сухого и увлажнённого вводов на частотах от 15 до 400 Гц. Хотя разница уже видна на промышленной частоте, на низких частотах разница проявляется ещё заметнее и при сильном увлажнении изоляции приводит к тому, что кривая зависимости принципиально меняет свою форму.



*Рис. 1. Зависимость  $\text{tg } \delta$  RIP-изоляции вводов 110 кВ от частоты*

В рамках данной работы проводились измерения характеристик изоляций разных вводов, среди них были новые вводы с RIP-изоляцией, вводы, поступившие из эксплуатации, и вводы, находившиеся на хранении в различных условиях. Также были про-

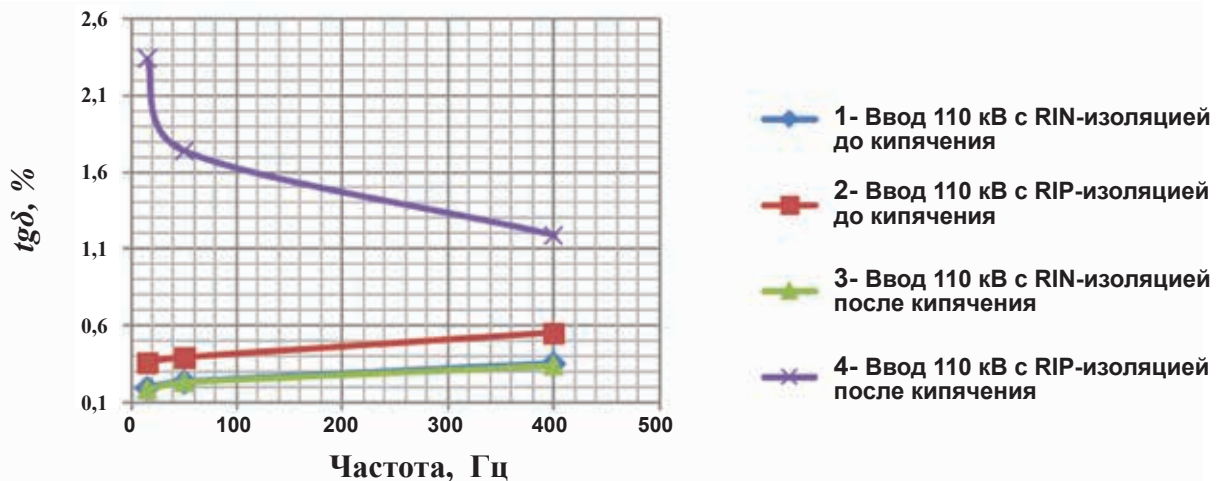
ведены измерения диэлектрических характеристик вводов с RIN-изоляцией.

Был проведён опыт, который однозначно и красноречиво подтвердил увлажнение RIP-изоляции и неподверженность увлажнению RIN-изоляции в

одинаковых условиях. На бак, предназначенный для испытаний на влагонепроницаемость внешней полимерной изоляции, были установлены два ввода 110 кВ, один с RIP-, другой с RIN-изоляцией. Уровень жидкости в баке (раствор воды с NaCl) был выставлен таким образом, чтобы изоляции вводов полностью находились над раствором и не касались воды. После чего был включён подогрев и раствор был доведён до кипения. Испытание продолжалось 48 часов.

После испытаний вводы были демонтированы с испытательного бака и охлаждены до комнатной температуры. Затем было проведено измерение частотной характеристики изоляций данных вводов, причём изоляция ввода с RIP-изоляцией была перед измерением вытерта ветошью, смоченной спиртом. На рис. 2 приведены характеристики данных вводов до и после испытания.

При рассмотрении кривых № 2 и 4 (состояние RIP-изоляции до и после кипячения) становится



**Рис. 2. Сравнение изменения зависимости  $tg \delta$  от частоты вводов с RIP- и RIN-изоляцией после принудительного увлажнения в солёном тумане**

очевидно, что изоляция ввода сильно увлажнилась, о чём свидетельствуют гораздо более высокие значения  $tg \delta$  во всём представленном частотном диапазоне. Измерения на данном вводе были проведены повторно через несколько дней. Показания не снизились, что могло бы говорить о частичном «подсыхании» изоляции, а наоборот, тангенс угла диэлектрических потерь изоляции ещё более увеличился, что свидетельствует о глубоком проникновении влаги в толщу изоляции ввода.

В то же время состояние ввода с RIN-изоляцией осталось неизменным, кривые № 1 и 3 на рис. 2 практически идентичны, что красноречиво подтверждает отсутствие какого-либо влияния влаги на состояние RIN-изоляции.

На рис. 3 приведены температурные зависимости  $tg \delta$  RIP- и RIN-изоляции, для частоты 50 Гц. Данные кривые были получены после нагрева вводов до температуры 70 °С с последующим остыванием до температуры окружающей среды.

Как видно, обе характеристики имеют температурную зависимость. При понижении температуры от 60 °С до 10 °С  $tg \delta$  обоих типов изоляции имеет тенденцию к увеличению, но если RIP-изоляция при

любой из этих температур имеет  $tg \delta$  не превышающий 0,46 %, то у RIN-изоляции  $tg \delta$  во всём температурном диапазоне имеет заметно более низкие значения и не превышает 0,27 % во всем диапазоне температур. В то же время из публикаций зарубежных производителей вводов известно, что среднее значение  $tg \delta$  для вводов с RIS-изоляцией (зарубежный аналог RIN-изоляции) составляет  $\leq 0,35$  % [1].

Из проведённых исследований следуют два вывода:

- испытанные вводы производства компании «Изолятор» не уступают по своим характеристикам вводам зарубежного производства;
- RIN-изоляция не способна увлажняться и имеет огромные перспективы для использования в качестве внутренней изоляции высоковольтных вводов.

### ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВВОДОВ С RIN-ИЗОЛЯЦИЕЙ

Процесс изготовления RIN-изоляции (в зарубежной литературе встречается как RIS-изоляция [2]) идентичен RIP-технологии, однако свойства материала позволяют исключить длительную, трудоёмкую и энергозатратную операцию термовакуумной сушки.

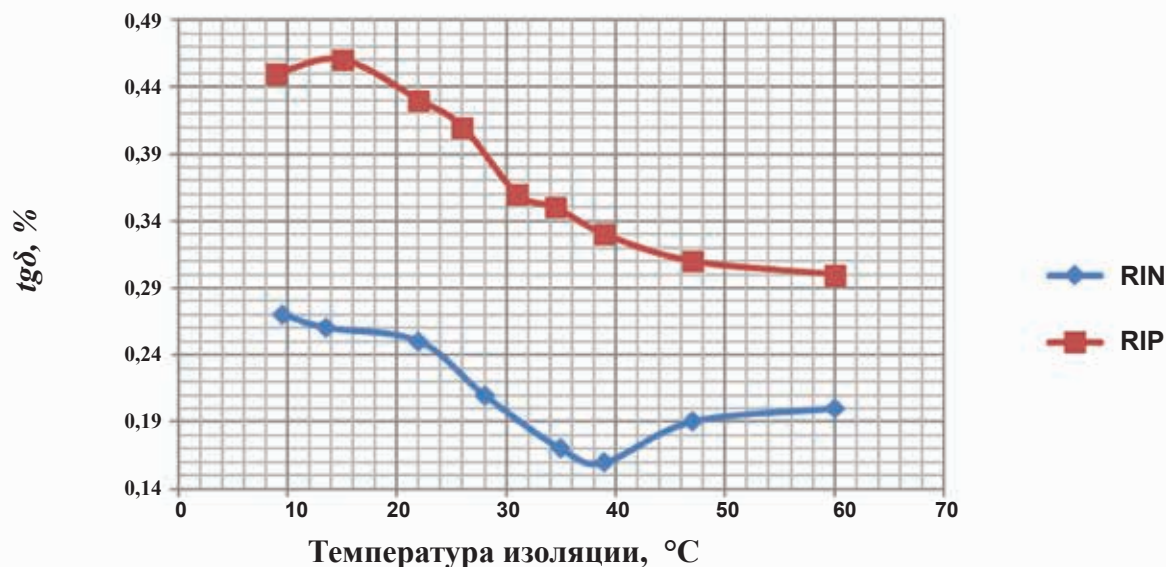


Рис. 3. Изменение  $tg \delta$  от температуры разных типов твёрдой изоляции

Основной конструктивной частью конденсаторного ввода с твёрдой RIN-изоляцией служит его изоляционный остов, который изготавливается из специального нетканого материала, волокна которого имеют превосходную адгезию с эпоксидным компаундом, которым впоследствии будет пропитан остов. Внутри остова при намотке помещаются алюминиевые обкладки, служащие для оптимального распределения электрического поля как внутри, так и снаружи высоковольтного ввода. Намотка нетканого материала на трубу осуществляется на специальном оборудовании с автоматическим контролем натяжения бумаги для получения заданной плотности (рис. 4). Так как нетканый материал не содержит целлюлозы и не подвержен увлажнению, пред-



Рис. 4. Изоляционный остов с RIN-изоляцией на намоточном станке TUBOLY

варительная его сушка не производится, что также уменьшает трудоёмкость и время изготовления по сравнению с RIP-изоляцией.

После намотки остовы помещаются в специальные камеры для пропитки под вакуумом. Пропитывающая смола готовится на специальной установке с обязательным контролем состава, вязкости и других параметров для каждой партии. После пропитки и полимеризации остовы подвергаются нагреву в соответствии с определённым температурным режимом для снятия остаточных механических напряжений (рис. 5).

Тщательный контроль за соблюдением технологических режимов в процессе сушки, пропитки, а также во время цикла отверждения обеспечивает постоянно высокое качество получаемых изоляционных остова в отношении уровня частичных разрядов и механических характеристик. После отверждения изоляционному остову придаётся определенная форма путём токарной обработки. Дальнейшая сборка ввода производится аналогично вводам с RIP-изоляцией.

### ПРЕИМУЩЕСТВА RIN-ИЗОЛЯЦИИ

1. Основным преимуществом RIN-изоляции является её гидрофобность, т.е. неспособность нетканого материала смачиваться водой.

Отсутствие бумаги в конструкции ввода исключает способность изоляционного остова поглощать влагу, что, в свою очередь, делает коэффициент электрических потерь материала абсолютно стабильным и не зависящим от воздействия очень высокой влажности. Это обеспечивает простоту транспорти-



*Рис. 5. Вакуумная смесительная и заливочная установка*

ровки, отсутствие особых требований при хранении, а также надёжность работы в период эксплуатации. Вводы с RIN-изоляцией характеризуются очень низким коэффициентом диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  0,20–0,25 %, что значительно ниже требований, указанных в стандартах на высоковольтные вводы IEC 60137:2017 [3] и ГОСТ Р 55187-2012 [4] и нормируемых величиной 0,7 %.

2. Не оставляющий пустот процесс пропитки за счёт химической реакции синтетической нити и эпоксидной смолы позволяет обеспечить отсутствие частичных разрядов внутри изоляции вплоть до максимального рабочего напряжения.

3. RIN-изоляция обладает высокой теплопроводностью и низким коэффициентом теплового расширения, что ведёт к уменьшению напряжения между механически соединёнными элементами ввода. Это важно для эксплуатации при предельных температурах, как высоких, так и низких.

### **ИСПЫТАНИЯ ВВОДОВ С RIN-ИЗОЛЯЦИЕЙ**

Всего для проведения испытаний было изготовлено в общей сложности более 20 высоковольтных вводов различных типов и классов напряжения от 35 до 550 кВ (рис. 6).

Все образцы прошли стандартные приёмочные испытания в соответствии с ГОСТ Р 55187 и МЭК 137 (IEC 60317:2008) [3]. Кроме того, некоторые образцы подвергались длительным ресурсным испытаниям, а также испытанию на тепловую устойчивость и испытания номинальным током.

Ещё на одном специфическом испытании необходимо остановиться более подробно.

Для токоограничивающего устройства, использующего в своей работе эффект сверхпроводимости, потребовалась разработка ввода, способного надёжно работать при сверхнизких температурах. Уникальность такого ввода заключается в том, что его нижняя часть предназначена для работы в среде жидкого азота при температуре  $-196^\circ\text{C}$ . Проведённые исследования показали, что материал RIN-изоляции не способен сохранять свои механические свойства при таких температурах из-за содержания влаги внутри изоляции. Даже её минимального количества в структуре изоляции оказалось достаточно, чтобы после заморозки разрушить материал изоляции.

Единственным материалом, не содержащим влаги, оказался нетканый материал, и, соответственно, RIN-изоляция. Для проведения испытаний по спе-



*Рис. 6. Вводы 252–550 кВ на сборочном стенде*

циальной технологии были изготовлены опытные вводы 126 и 252 кВ с полимерной изоляцией.

Испытания проводились с расположением нижней части вводов в криостате, заполненном жидким азотом (рис. 7).

После всех проведённых испытаний состояние вводов осталось неизменным, что подтверждает огромный запас по холодостойкости данного вида изоляции. После завершения испытаний один из высоковольтных вводов был распилен для оценки адгезии материала основной изоляции к обкладкам изоляционного остова. По нашим оценкам, адгезия материала изоляции к обкладкам не изменилась и обеспечивает отсутствие частичных разрядов во вводе даже при наибольшем рабочем напряжении и при расположении нижней части в жидком азоте.

Таким образом, компания «Изолятор» – единственный в мире производитель высоковольтных вводов, который успешно провёл приёмочные испытания вводов 126 и 252 кВ с расположением нижней части ввода в жидком азоте при температуре  $-196^{\circ}\text{C}$ .



*Рис. 7. Ввод 252 кВ в криостате с жидким азотом перед проведением испытаний*

По состоянию на сегодняшний день вводы с RIN-изоляцией прошли весь комплекс необходимых испытаний и готовится их аттестация в ПАО «Россети». Первая опытная партия вводов 126 кВ для выключателей отгружена для опытной эксплуатации в МОЭСК (рис. 8).

## ПЕРСПЕКТИВЫ ВВОДОВ С RIN-ИЗОЛЯЦИЕЙ

Как выяснилось в процессе проведения опытных работ, в изоляции ввода можно заменить не только бумагу, но и эпоксидный компаунд. В RIN-изоляции бумага в том числе выполняет функцию наполнителя для эпоксидного компаунда. Если заменить бумагу на сетку из полимерных синтетических волокон, то можно эпоксидный компаунд заменить на наполненную эпоксидную смолу, т.е. жидкостью с намного более высокой вязкостью, чем у традиционных жидкостей для пропитки, таких как масло или чистая смола. Применение наполненных эпоксидных смол открывает путь к крупным техническим усовершенствованиям технологии производства высоковольтных вводов



*Рис. 8. Вводы с RIN-изоляцией для ПАО «МОЭСК»*

(рис. 9). При использовании наполненных эпоксидных смол изоляционный остов может отливаться прямо в своём конечном виде и отверждаться в результате быстро протекающего процесса. Сушку изоляции перед пропиткой можно полностью исключить ввиду того, что волокна по сравнению с бумагой практически не впитывают влагу, также можно исключить токарную обработку изоляции после полимеризации, что резко сократит время изготовления высоковольтного ввода. Что касается находящихся на воздухе частей ввода, то непосредственно на поверхность изоляционного остова можно наносить полимерную внешнюю изоляцию, формируя наружный изолятор, форма и свойства которого обеспечивают требуемую длину пути



**Рис. 9. Намотка изоляции с использованием полимерной сетки**

утечки и электроизоляционные характеристики в условиях наружной среды. Указанные выше особенности дают в результате необычайно короткое время изготовления высоковольтного ввода.

В настоящее время проводятся опытные работы по изготовлению и испытаниям опытных образцов вводов с применением принципиально новой технологии (рис. 10).

В результате этих работ были изготовлены несколько вводов 35 и 110 кВ, которые сегодня проходят необходимые испытания.

Новый вид изоляции обладает рядом преимуществ по сравнению с классической RIP- или RIN-технологиями. Наполненные смолы характеризуются намного более высокой теплопроводностью по сравнению с чистыми смолами. Это объясняется тем, что теплопроводность неорганических наполнителей, которые внедряются в эпоксидную смолу, во много раз выше, чем у основного эпоксидного



**Рис. 10. Ввод 35 кВ в Испытательном центре**

материала. Таким образом, вводы с данным типом изоляции лучше отводят тепло и обладают более высоким классом термической стойкости.

Тепловое расширение наполненных эпоксидных смол значительно меньше, чем чистых. Применение таких смол во вводе, в котором используются металлические детали с меньшим коэффициентом теплового расширения, значительно предпочтительнее, т.к. приводит к меньшим механическим напряжениям в месте их соприкосновения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пропитанный смолой нетканый материал (RIN) является первой технологией полностью сухих вводов с емкостным распределением напряжения, в которой может использоваться наполненная эпоксидная смола в качестве пропиточного материала внутренней изоляции. Это становится возможным благодаря тому, что в качестве основы для размещения конденсаторных обкладок может использоваться ткань из полимерных волокон.

RIN-изоляция не поглощает воду, а его диэлектрические потери не зависят от долгого воздействия очень высокой влажности, что подтверждено проведенными на заводе испытаниями. Это обеспечивает простоту транспортировки, отсутствие особых требований к длительному хранению и надёжность работы в период эксплуатации.

С применением наполненных смол в RIN-технологии производственный процесс можно радикально сократить по сравнению с другой современной RIP-технологией.

Для полного изучения возможности применения этой новой технологии потребуются дальнейшие исследования и разработки, но уже на данном этапе ясно, что по сравнению с RIP-технологией она имеет значительные преимущества.

Дальнейшие испытания должны подтвердить возможность её применения для всех типов высоковольтных вводов всех классов напряжения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Статья в журнале *INMR*, сентябрь, 2017 «*RIS Bushing Technology: Reliability Testing & Field Experience*».
2. Публикация *SIGRE*, февраль 2011 «*Guide for Transformer Maintenance, Working Group A2.34*».
3. IEC 60137:2017 *Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V (МЭК 137(2017) Изолированные проходные изоляторы для переменного напряжения свыше 1 000 В)*.
4. ГОСТ Р 55187-2012 *Вводы изолированные на номинальные напряжения свыше 1000 В переменного тока. Общие технические условия*.