

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Н.В. ЩЕГЛОВ

СОВРЕМЕННЫЕ ВИДЫ ИЗОЛЯЦИИ

Часть 2

ИЗОЛЯЦИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ

Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2010

УДК 621.3.048.83(075.8)
Щ 334

Рецензенты:

В.И. Ключенович, канд.техн. наук, доц.,

Н.В. Цуркан, канд.техн. наук, доц.

Работа подготовлена на кафедре техники
и электрофизики высоких напряжений

Щеглов Н. В.

Щ 334 Современные виды изоляции. Ч. 2: Изоляция высоковольтных вводов : учеб. пособие / Н.В. Щеглов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 72 с.

ISBN 978-5-7782-1317-3

Рассмотрены вопросы, связанные с современными типами изоляции высоковольтных вводов, технологией их изготовления, а также общие принципы конструирования и их методы расчетов.

Предназначено для студентов 5-го курса и магистрантов, обучающихся по специальности «Высоковольтная электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.3.048.83(075.8)

Щеглов Николай Владимирович

СОВРЕМЕННЫЕ ВИДЫ ИЗОЛЯЦИИ

Часть 2

Изоляция высоковольтных вводов

Учебное пособие

Редактор *Т.П. Петроченко*

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*

Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*

Компьютерная верстка *В.Ф. Ноздрева*

Подписано в печать 05.02.2010. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.

Уч.-изд. л. 4,18. Печ. л. 4,5. Изд. № 308. Заказ № . Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

ISBN 978-5-7782-1317-3

© Щеглов Н. В., 2010

© Новосибирский государственный
технический университет, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтные вводы служат изоляционными конструкциями в аппаратах энергетического и электротехнического назначения и используются для ввода или вывода высокого напряжения. Они являются обязательными элементами силовых трансформаторов, реакторов, испытательных установок высоковольтных лабораторий и другого оборудования.

Высоковольтными вводами принято называть более сложные проходные изоляторы на напряжения ≥ 35 кВ с применением мер по регулированию электрического поля и имеющие внутреннюю изоляцию из диэлектрических материалов с более высокой электрической прочностью, чем воздух при атмосферном давлении.

Необходимость применения в высоковольтных вводах твердых, жидких или специальных газообразных диэлектрических материалов, а не окружающего нас естественного и самого дешевого диэлектрика – воздуха – обусловлена рядом причин. Во-первых, используемые материалы обладают более высокой электрической прочностью, это позволяет резко сократить изоляционные расстояния между проводниками и создавать высоковольтные установки с высокими технико-экономическими показателями. Во-вторых, внутренняя изоляция или ее отдельные элементы выполняют функцию механического крепления проводников, находящихся под высоким напряжением. Через внутреннюю изоляцию осуществляется отвод тепла, выделяющегося при прохождении рабочих токов. Использование жидких диэлектриков (трансформаторного масла) позволяет в ряде случаев значительно улучшить условия охлаждения за счет естественной или принудительной циркуляции изоляционной жидкости.

Кроме применения изоляционных материалов с высокой электрической прочностью при конструировании высоковольтных вводов применяются специальные меры для более равномерного распределения напряжения с целью увеличения разрядных напряжений и снижения габаритов.

Глава 1

СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ТИПЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ

1.1. ТИПЫ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ

Важнейшей частью любого высоковольтного ввода является внутренняя изоляция, качество которой определяет его надежность и внутренний ресурс. В табл. 1.1 приведены типы изоляции, выпускаемые мировой энергетической промышленностью.

Таблица 1.1

Типы изоляции современных высоковольтных вводов

Наименование типа внутренней изоляции	Наименование, соответствующее публикации МЭК 137	Допустимая рабочая напряженность $E_{\text{раб.доп.}}$, кВ/мм
Бумажно-масляная изоляция (БМИ)	Oil impregnated paper (OIP) (бумага, пропитанная маслом)	3.6...4.0
Бумажная изоляция, покрытая смолой	Resin bounded paper (RBP) (бумага, покрытая смолой)	1.6...2.0
Бумажная изоляция, пропитанная смолой	Resin impregnated paper (RIP) (бумага, пропитанная смолой)	4.0...6.0

Бумажно-масляная изоляция (БМИ) конденсаторного типа более полувека используется в отечественных и зарубежных высоковольтных вводах. Монопольное положение БМИ во вводах высокого напряжения обусловлено целым рядом достоинств этой изоляции: достаточно высокая электрическая прочность (кратковременная и длительная),

относительно низкий уровень диэлектрических потерь, хорошая совместимость с изоляцией силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов классов напряжения от 110 до 750 кВ.

С точки зрения эксплуатации вводы с БМИ имеют существенные недостатки – 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, взрыво- и пожароопасность. Эксплуатация маслонаполненных вводов связана с потенциальной опасностью пробоя ввода и возможной утечки 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 последствиями.

В настоящее время стараются уходить от применения трансформаторного масла и заменять его другими видами изоляции. В высоковольтных вводах альтернативой трансформаторному маслу стала твердая RBP- и RIP-изоляция.

RBP-изоляцию применяют только во вводах для масляных выключателей. Изоляцию этого типа получают при намотке лакированной бумаги, которая под воздействием высокой температуры и давления полимеризуется, превращаясь в монолитное тело. Для регулирования электрического поля между слоями бумаги помещают проводящие графитовые обкладки. При такой изоляции удается устранить ряд недостатков, характерных для вводов с БМИ. Однако у RBP-изоляции имеются и недостатки, связанные с технологией ее изготовления, при которой значительная часть объема остается непропитанной и содержит большое количество газовых включений. Это объясняется 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.

Уровень частичных разрядов, характеризующий электрическую прочность изоляции, во вводах с RBP-изоляцией достигает до 250 пКл вместо 10 пКл во вводах с БМИ, это ограничивает область использования RBP-изоляции. Электрическая прочность RBP-изоляции оказывается недостаточной для создания вводов на напряжение 220 кВ и более с высокими экономическими показателями.

RIP-изоляция имеет высокую термическую и механическую стойкость. Ее получают при намотке специальной крепированной бумаги, которая пропитывается эпоксидным компаундом под вакуумом, что исключает наличие в изоляции газовых включений. Это дает низкий уровень частичных разрядов до 5 пКл при рабочем напряжении и до 10 пКл при испытательном напряжении. 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 вес ввода, уменьшаются его радиальные размеры, отпадают проблемы герметизации конструкции, компенсации температурных изменений объема масла. В настоящее время наиболее совершенной и перспективной для вводов в трансформаторах, выключателях, реакторах и линейных вводах практически всех классов напряжения является RIP-изоляция.

Конструкция высоковольтного ввода с RIP-изоляцией приведена на рис. 1.1.

Ввод состоит из следующих конструктивных элементов:

- внутренней твердой изоляции типа RIP, изготовленной намоткой на центральную трубу крепированной электроизоляционной бумаги с последующей пропиткой эпоксидным компаундом под вакуумом и полимеризацией;
- соединительной втулки, напрессованной на внутреннюю изоляцию;
- измерительного вывода, заземленного во время эксплуатации;
- опорного фланца, предназначенного для крепления ввода на электрическом аппарате либо на другой конструкции;
- фарфоровой крышки или внешней полимерной изоляции типа RTV-2;
- защитного экрана;
- контактной шпильки и контактной клеммы.

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, они обеспечивают оптимальное

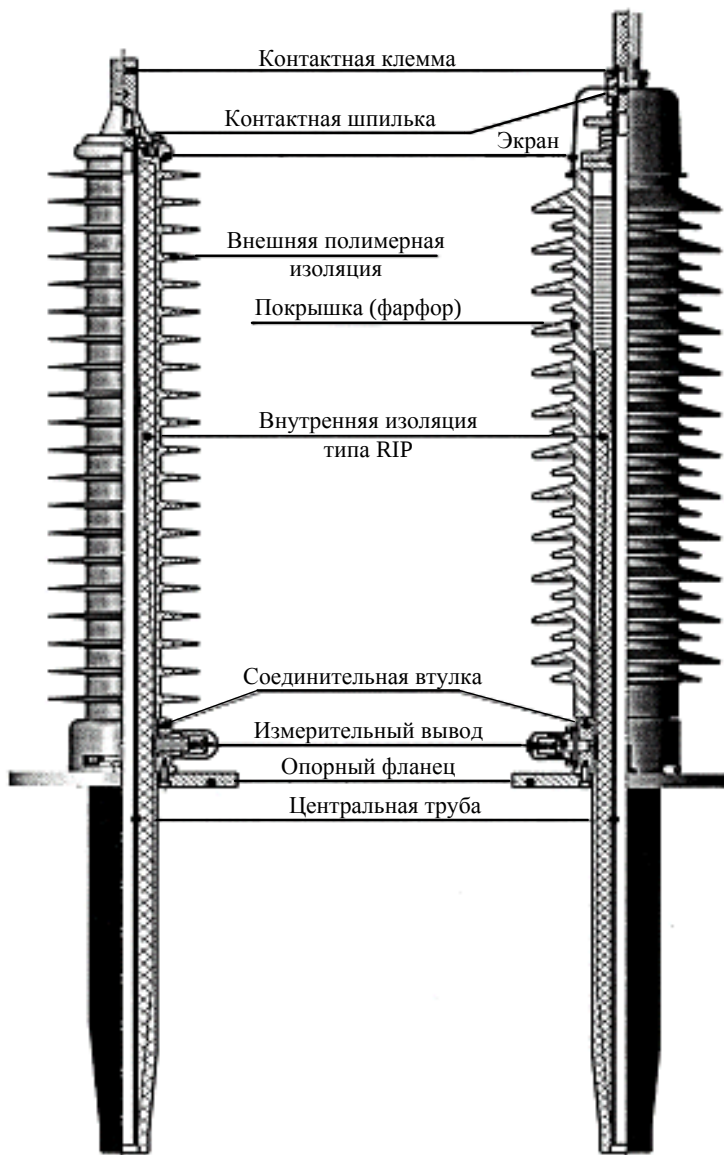


Рис. 1.1. Конструкция вводов с RIP-изоляцией

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 готовят в специальном помещении с нормированным климатом, уровень требований к которому выше, чем в сборочном цехе.

Размеры и расположение обкладок рассчитываются на компьютере по специально разработанной программе и задаются в конструкторской документации. После намотки остов помещают в сушильную печь, далее в герметичную специальную камеру для пропитки под вакуумом. Пропитывающий компаунд на основе эпоксидной смолы готовят на специальной установке с автоматическим контролем состава, температуры, уровня вакуума и других параметров. После пропитки остов подвергается полимеризации при воздействии высокой температуры и давления по определенному технологическому режиму. 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. Подбор определенного температурного режима полимеризации и последующая выдержка при нормальной температуре позволяют скомпенсировать остаточные механические напряжения.

В RIP-изоляции как в композиционном материале на механическую прочность влияет количественное соотношение бумага (наполнитель) – эпоксидная смола (пропитывающий состав). После полимеризации и отверждения изоляционному остову придается определенная форма путем токарной обработки.

Ряд ведущих зарубежных фирм (ABB, HSP-Siemens, Bushing и др.) уже длительное время выпускает трансформаторные и линейные вводы с RIP-изоляцией. Признанным мировым лидером в этой области является швейцарская компания ABB Micafil, которая полностью перешла на производство этих вводов, прекратив выпуск вводов с RBP-изоляцией.

1.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВО ВВОДАХ

Во всех реальных конструкциях вводов с БМИ и твердой внутренней изоляцией 110 кВ и выше для регулирования электрического поля используют системы конденсаторных (уравнительных) обкладок. Обкладки из алюминиевой фольги толщиной 0.014 мм закладывают в изоляционное тело при намотке слоев бумаги. Эффект регулирования электрического поля достигается при этом за счет того, что обкладки из проводящего материала принудительно создают такую систему эквипотенциальных поверхностей, которой соответствует более однородное поле во внешней и внутренней изоляции ввода.

В основном используются так называемые равноемкостные системы конденсаторных обкладок, в которых размеры обкладок выбирают такими, что емкости между всеми парами соседних обкладок получаются одинаковыми. Поэтому напряжение, приложенное к вводу, равномерно распределяется по слоям между обкладками. Если длины уступов одинаковы для всех пар обкладок, то средние напряженности в аксиальном направлении получаются постоянными. Одновременно более равномерным получается поле и в радиальном направлении.

У краев конденсаторных обкладок электрическое поле получается резко неоднородным, но области повышенных напряженностей имеют относительно небольшие размеры. Так, область у края обкладки, в пределах которой напряженность поля превышает среднюю в три раза и более, имеет размеры около 2 % от толщины слоя изоляции между обкладками. Поэтому число обкладок принимают достаточно большим, чтобы толщины слоев изоляции между обкладками были относительно малыми.

В результате области с резко неоднородными полями у краев конденсаторных обкладок оказываются настолько малыми, что развитие в них разрядных процессов затрудняется.

Длина последней, заземляемой, конденсаторной обкладки (считая от токоведущего стержня) несколько больше, чем длина втулки. Благодаря этому экранируются острые края втулки и напряженность электрического поля снижается. Исключается возможность появления в этом месте короны, что значительно повышает разрядное напряжение в воздухе вдоль поверхности изоляционного тела. Эффективность использования внутренней изоляции конденсаторного типа подтверждена результатами исследований и длительной практикой применения

этой изоляции во вводах, трансформаторах тока, кабельных муфтах на напряжения 110 кВ и выше и созданием вводов на ультравысокое напряжение (выше 1000 кВ).

Эксплуатационная надежность вводов с БМИ определяется не только электрической прочностью изоляционного остова, а в первую очередь прочностью масляного канала промежутка «остов – фарфоровая крышка». Электрические воздействия на этот промежуток определяются не только конструкцией самого ввода, но и расположением ввода относительно обмотки и заземленных частей трансформатора.

Наиболее нагруженной зоной внутренней изоляции является масляный канал между металлической гайкой и поверхностью фарфоровой крышки в нижней части ввода. На рис. 1.2 приведены конструктивные меры для снижения напряженности в нижней части ввода.

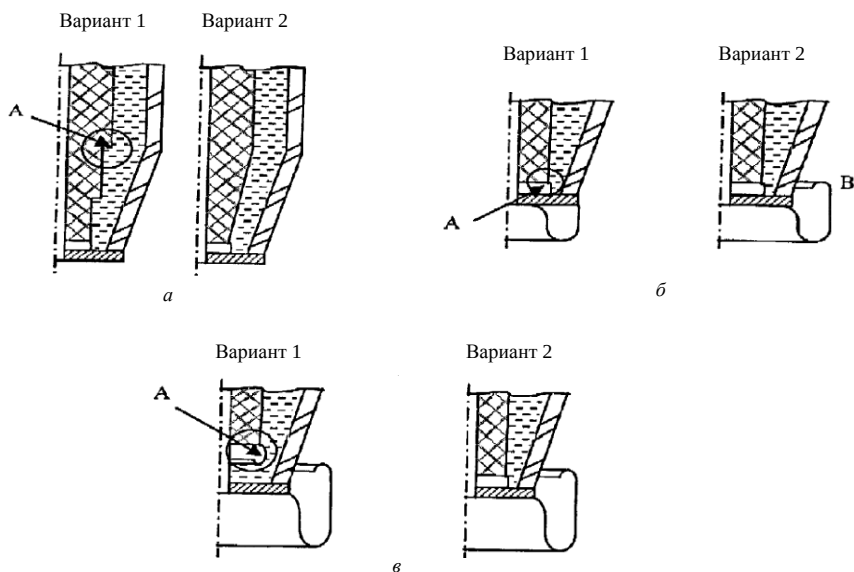


Рис. 1.2. Конструктивные меры для улучшения характера распределения электрического поля в нижней части ввода:

а – переход от ступенчатой подрезки изоляционного остова к конусной; *б* – изменение экранировки за счет формы нижнего экрана ввода; *в* – изменение экранировки за счет изменения узла крепления изоляционного остова ввода

1.3. ПОКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОДОВ ТВЕРДЫМ ИЗОЛЯЦИОННЫМ МАТЕРИАЛОМ

Эффективность покрытия тем больше, чем однороднее поле. При сильно неоднородных полях влияние покрытия существенно уменьшается, и в тех случаях, когда искровому разряду предшествует явление короны, действие покрытия относительно мало.

В однородных полях разрядное напряжение повышается на 10...70 %, в сравнительно однородных – на 25...30 %, в резко неоднородных – на 10...15 % и менее. При покрытии электродов разброс отдельных значений пробивного напряжения в сравнительно однородных полях уменьшается, так что практическая эффективность, т. е. увеличение наименьшего пробивного напряжения при применении покрытия, может быть больше указанных выше значений. При длительном воздействии напряжения эффективность покрытия также возрастает.

Толщина покрытия не оказывает существенного влияния на пробивное напряжение до тех пор, пока покрытие значительно не изменяет напряженность поля вблизи электродов. При импульсных воздействиях покрытие электродов практически не сказывается на величине пробивного напряжения.

Покрытия действуют благоприятно в тех случаях, когда влага и волокна снижают пробивное напряжение. Зависимость действия покрытия от степени однородности поля носит тот же характер, что и зависимость снижения пробивного напряжения масла под влиянием влаги и волокон. При покрытых электродах проводящие частицы в масле хотя и движутся в область большей напряженности поля, но снова большей частью оттуда изгоняются. В особенности это выдувание заметно в увлажненных маслах. В сухих же маслах еще отмечаются некоторые признаки образования мостов.

Таким образом, влияние покрытия сводится к уничтожению или затруднению образования мостиков из проводящих примесей, т. е. уменьшается действие влаги и волокон на пробивное напряжение масла. В случае образования мостиков из волокон, что может наблюдаться и в сухих маслах, пробивное напряжение благодаря покрытию увеличивается, потому что ток, текущий по проводящему мосту и подготавливающий пробой, ограничен емкостью слоя покрытия. При покрытии лишь одного из электродов пробой при переменном напряжении совершается, когда непокрытый электрод имеет положительную поляр-

ность. В реальных конструкциях тонкие покрытия могут иметь механические повреждения, проколы и т. п.

Проведенные исследования показали, что прокол или пробой покрытия без его значительного обугливания не оказывает большого влияния на величину пробивного напряжения масляного промежутка.

В настоящее время ЗАО «Мосизолятор» применяет покрытие экранов и ряда деталей внутри ввода, расположенных в трансформаторном масле, эпоксидным порошком путем напыления в электрическом поле. Толщина такого покрытия составляет 180... 250 мкм.

1.4. ВНЕШНЯЯ И ВНУТРЕННЯЯ ИЗОЛЯЦИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ

Внешняя изоляция ввода. При современных средствах регулирования электрического поля разрядное напряжение внешней изоляции почти линейно зависит от высоты верхней части изоляционного тела. Средние разрядные напряженности составляют 3,0...3,5 кВ/см при воздействии напряжения промышленной частоты.

Увлажнение слоя загрязнения атмосферными осадками приводит к резкому увеличению его проводимости. Распределение напряжения вдоль поверхности изоляционного тела зависит теперь только от распределения загрязнений и может быть различным, в том числе и слабо неоднородным. При этом изменяется механизм развития разряда в воздухе вдоль поверхности изоляционного тела и возможны два варианта развития процесса. При относительно небольшом токе утечки, проходящем через канал частичных дуговых разрядов (ЧДР), разряд оказывается неустойчивым и быстро (в доли секунды) гаснет. Сухой участок вновь увлажняется осадками, и весь процесс повторяется. Таким образом, возникают перемежающиеся разряды (многократные зажигания и погасания дуговых разрядов – ЧДР), которые при неизменных внешних условиях могут существовать часами.

Полного перекрытия внешней изоляции при этом не происходит, но такой режим опасен, так как ЧДР развиваются вблизи поверхности изоляционного тела. Вследствие высокой температуры в канале ЧДР эти разряды могут разрушать поверхность изоляционного тела, образуя на ней черные, проводящие (обугленные), разветвленные следы-треки. Появление треков резко снижает разрядное напряжение в воздухе вдоль поверхности ввода. Поэтому внешняя часть вводов, предна-

значенная для работы на открытом воздухе, должна выполняться из трекингоустойчивых материалов. К их числу принадлежат фарфор, стекло, кремнийорганические резины и еще ограниченный круг изоляционных материалов.

При относительно большом токе утечки (сильное загрязнение) ЧДР горят устойчиво и быстро увеличиваются в длине со скоростью до 50 м/с, процесс завершается полным перекрытием поверхности изоляционного тела ввода.

Важным средством повышения разрядного напряжения в условиях загрязнения и увлажнения наружной поверхности ввода является создание на изоляционном теле ребер, увеличивающих длину пути утечки без увеличения высоты конструкции.

Для обеспечения достаточно малой вероятности перекрытия по загрязненной и увлажненной поверхности ввода при рабочем напряжении нормирована удельная длина пути утечки по поверхности, т. е. длина пути утечки на единицу наибольшего линейного напряжения ввода (табл. 1.2)

Т а б л и ц а 1.2

Значения удельной поверхностной проводимости

Степень загрязнения	Удельная длина пути утечки, мм/кВ	Удельная поверхностная проводимость, мкСм
I легкая	16	До 5
II средняя	20	5...10
III сильная	25	10...20
IV очень сильная	31	Более 20

Внутренняя изоляция ввода. Особенность внутренней изоляции состоит в том, что практически для всех ее разновидностей характерна сильная зависимость электрической прочности от длительности воздействия напряжения. Поэтому в инженерной практике для внутренней изоляции принято различать:

- кратковременную электрическую прочность при грозовых импульсах напряжения стандартной формы;
- кратковременную электрическую прочность при коммутационных импульсах напряжения стандартной формы;

- кратковременную электрическую прочность при одноминутном воздействии переменного напряжения промышленной частоты;
- длительную электрическую прочность при воздействии напряжения промышленной частоты в течение времени, соответствующего заданному сроку службы (25 лет и более).

Чтобы обеспечить требуемый срок службы (не менее 25 лет) и соответствующие ему малые темпы электрического старения внутренней изоляции, установлены допустимые значения кажущегося заряда частичных разрядов при переменном напряжении (табл. 1.3).

Т а б л и ц а 1.3

Максимальные значения интенсивности частичных разрядов

Тип изоляции ввода	Максимальная интенсивность частичных разрядов, пКл, измеренная при указанных значениях напряжения		
	$U_{нб.р}$	$1,5 \frac{U_{нб.р}}{\sqrt{3}}$	$1,05 \frac{U_{нб.р}}{\sqrt{3}}$
Бумага, пропитанная маслом (БМИ)	10	10	5
Бумага, пропитанная смолой (RIP)	10	10	5
Бумага, склеенная смолой (RBP)	—	250	100

Уровни кратковременной и длительной электрической прочности существенно различаются. Для разных видов внутренней изоляции они могут различаться в 10–20 раз и более. Кратковременная электрическая прочность – это не всегда напряжение, соответствующее сквозному пробое изоляции. Во многих случаях – это напряжение, при котором во внутренней изоляции возникают мощные частичные разряды, вызывающие необратимые повреждения. Нарушение кратковременной электрической прочности внутренней изоляции происходит, когда максимальная напряженность в изоляционном промежутке достигает некоторого критического значения. Поэтому для создания рациональной конструкции этой изоляции большое значение имеет эффективное регулирование электрического поля. Физические процессы, опреде-

ляющие кратковременную электрическую прочность различных видов внутренней изоляции, весьма сложны, описание этих процессов, пригодных для инженерной практики, отсутствует. Поэтому все сведения о кратковременной электрической прочности разных видов внутренней изоляции получают опытным путем при соответствующих испытаниях макетов или натурных образцов вводов.

Исключением является так называемый тепловой пробой, суть которого состоит в том, что при определенных условиях количество тепла, выделяющегося в единицу времени в изоляции за счет диэлектрических потерь, становится больше количества тепла, которое отводится в единицу времени в окружающую среду, т. е. нарушается тепловой баланс и температура изоляции неограниченно растет. Вследствие этого происходит разрушение диэлектрического материала с потерей свойств, в том числе и электрической прочности. Развитие теплового пробоя возможно при относительно длительном воздействии напряжения (минуты, часы), достаточном для разогрева крупной изоляционной конструкции. Для вводов имеются методики расчетной оценки напряжения теплового пробоя.

При определении кратковременной электрической прочности внутренней изоляции необходимо учитывать статистический характер явления пробоя, на который оказывают влияние толщина изоляции, форма электрического поля, площадь поверхности электродов и напряженный объем изоляции.

Длительная электрическая прочность внутренней изоляции определяется процессами электрического старения, приводящего к необратимому ухудшению свойств изоляции. Причиной этого являются частичные разряды, развивающиеся в мелких газовых включениях (доли миллиметра и более) или в местах локального увеличения напряженности электрического поля.

Непосредственное определение длительной электрической прочности опытным путем невозможно. Ее оценивают приближенно по результатам ускоренных испытаний на старение или по условию отсутствия частичного разряда некоторой определенной интенсивности. В последнем случае предполагается, что отсутствие частичного разряда означает и отсутствие электрического старения соответствующих темпов, т. е. достаточно большой срок службы. Длительная электрическая прочность внутренней изоляции любого вида зависит примерно от тех же факторов, что и кратковременная.

Важной особенностью внутренней изоляции любого вида является сильная зависимость ее поведения от тепловых и механических воздействий. Длительный нагрев сверх установленной нормы вызывает в изоляции ускорение сложных химических реакций, из-за чего ухудшаются свойства диэлектрических материалов. У твердых диэлектриков при этом снижается механическая прочность, у жидких – ухудшаются электрические характеристики. Для внутренней изоляции, используемой во вводах на напряжения 110 кВ и выше, изменение температуры на 6...8 °С увеличивает темпы теплового старения примерно в 2 раза. Для ограничения темпов теплового старения внутренней изоляции установлены значения длительно допустимых температур (ГОСТ 8866-70).

Кратковременные нагревы (тепловые удары) опасны тем, что могут вызвать за короткое время резкие структурные или химические изменения диэлектрических материалов с необратимым ухудшением электрических и механических свойств.

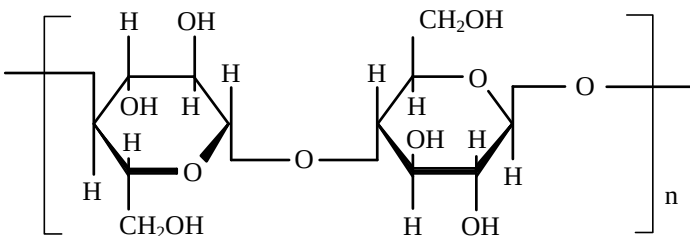
Механические воздействия опасны для внутренней изоляции (твердых ее элементов) не только тем, что при определенных условиях могут разрушить ее. При нагрузках, значительно ниже разрушающих, в твердых элементах изоляции возможно появление микротрещин, в которых возникнут частичные разряды и возрастут темпы электрического старения. Поэтому допустимые механические нагрузки на элементы внутренней изоляции, как правило, заметно ниже, чем для деталей из тех же материалов, работающих вне сильного электрического поля.

1.4.1. Структура целлюлозной бумаги

Бумага является по существу единственным твердым диэлектриком органического происхождения для изготовления внутренней изоляции высоковольтных вводов. Возможность изготовления бумаги в виде длинных тонких узких лент или широких полотен, смотанных в рулоны, позволяет относительно просто применять ее при изготовлении внутренней изоляции вводов конденсаторного типа путем намотки на специальных станках из рулонов с закладкой конденсаторных обкладок.

Основным сырьем для производства бумаги служит древесная целлюлоза, которая является высокомолекулярным веществом растительного происхождения, состоящим из длинных полимерных молекул. Вещество, составляющее стенки растительного волокна, – это альфа-

целлюлоза, молекулярное строение которой может быть представлено следующей формулой:



Бумагу отличает сильно развитая поверхность, что определяет высокую пористость и, как следствие, высокую гигроскопичность и резкое ухудшение электрических свойств бумаги при воздействии влаги. Для обеспечения высоких электрических свойств в технологическом процессе предусматривается длительная вакуумная сушка (от нескольких суток для вводов 110 кВ и до 45 суток для вводов сверхвысокого напряжения (330...750 кВ). Для повышения электрической прочности необходима пропитка, при которой поры бумаги заполняются жидким диэлектриком. Однако пропитка не устраняет гигроскопичности бумаги, поскольку крупные молекулы пропиточной массы не проникают в субмикropopы ($\sim 10 \text{ \AA}$) между молекулами целлюлозы, куда могут проникать молекулы воды с размерами $\sim 2,5 \text{ \AA}$ (размер молекулы неотвержденной эпоксидной смолы $\sim 30...50 \text{ \AA}$). Размеры макропор в еловой целлюлозе разного происхождения (беленой и небеленой, сульфатной и сульфитной, α -целлюлозы):

32...39 Å – не подвергавшейся сушке;

24...26 Å – высушенной при 105 °С и вновь увлажненной.

Поэтому после пропитки для защиты от влаги необходима дополнительная герметизация.

При пропитке компаунд может проникнуть не в каждую пору бумажной изоляции или другого диэлектрика. Пора диаметром d может быть заполнена пропитывающим составом, если будет достигнуто минимальное избыточное давление P :

$$P = \frac{4\sigma}{d}, \quad (1.1)$$

где σ – поверхностное натяжение.

Необходимо отметить, что пропитка целлюлозных волокон материалов лишь замедляет их увлажнение, потому что молекулы пропиточных веществ, имеющие большие размеры по сравнению с размерами молекул воды (на порядок и более), не в состоянии создать полную непроницаемость пор материала для влаги, а в наиболее мелкие поры пропитываемого материала они вообще не могут проникнуть.

1.4.2. Масло

В 1980-х и начале 1990-х годов отмечалось значительное количество повреждений конденсаторных маслонаполненных вводов напряжением 110...750 кВ. Все поврежденные вводы были заполнены маслом марки Т-750, имеющим высокое содержание ароматических углеводородов ($C_A \cong 40\%$). Повреждений вводов, заполненных маслом марки ГК ($C_A = 1...6\%$), не было, хотя срок эксплуатации таких вводов достигал и даже превышал 9 лет (максимум повреждений вводов с маслом Т-750 наблюдался примерно через 9 лет эксплуатации).

Несмотря на практически одинаковые запасы электрической прочности в масляных промежутках вводов одного и того же номинального напряжения, установленных в различных типах трансформаторов, имело место достаточно неравномерное распределение повреждений в разных типах трансформаторов. Температура масла в трансформаторах и реакторах, на которых повреждались вводы, была выше, чем в тех, где повреждений не было. Все повреждения представляли собой перекрытие изоляционного промежутка по внутренней поверхности нижней фарфоровой крышки.

Особенностью химического состава масла Т-750 является относительно высокое содержание ароматических углеводородов (до 40 %), присутствие небольшого количества смол (десятые доли процента) и около 0.2 % серы. Данный состав пропитки в герметичных вводах под действием высоких температур при низком содержании кислорода определяет особенности старения масла Т-750.

Отличительные особенности эксплуатации масла Т-750 следующие:

- высокая напряженность возникновения частичных разрядов в относительно равномерном электрическом поле и быстрое их затухание;
- химический состав определяет реакции старения масла, сопровождающиеся его потемнением и приводящие к увеличению $\text{tg } \delta$ и об-

разованию осадков, скорость такого старения возрастает с повышением температуры и увеличением напряженности электрического поля ($E > 4 \text{ кВ/мм}$);

- некоторые материалы ввода, такие, например, как уплотняющая резина, и могут растворяться маслом и образовывать коллоидные растворы, что приводит к увеличению $\text{tg } \delta$, потемнению масла и повышению его гигроскопичности. Этот процесс усиливается при повышенных температурах;

- масло Т-750 обладает высокой гигроскопичностью, содержит большое количество химически связанной воды, которая при длительной эксплуатации и повышении температуры переходит в растворенное состояние.

Электрическая прочность масла в большей степени зависит от количества растворенной воды. Поэтому процесс перехода связанной воды в растворенное состояние может приводить к значительному снижению электрической прочности.

Масло ГК имеет низкое содержание ароматических углеводородов, практически не содержит связанной воды и поэтому не подвержено такому виду старения.

Для обеспечения надежной работы вводов с БМИ особое значение имеют такие факторы, как устойчивость изоляционного материала к воздействию частичных разрядов, а также степень и характер взаимодействия между маслом и конструкционными материалами. При проектировании вводов с БМИ необходимо соблюдать требование совместности конструкционных материалов с трансформаторным маслом. Для этого, а также с целью исследования механизма нарушения изоляционных свойств при реальных условиях работы вводов исследования проводятся на моделях. Модели вводов включают в себя все основные конструктивные элементы герметичного высоковольтного ввода с меньшими размерами, но пропорциональными реальным (размеры обкладок, соотношение бумаги и масла и т. д.).

Испытания моделей на заводе «Изолятор» проводились с использованием трансформаторных масел марок Т-750 и ГК при температурах 70, 90 и 110 °С и при средних напряженностях в изоляции остова 3.7 и 4.5 кВ/мм. Длительность таких испытаний составляла 1000 ч.

Установлено, что на фарфоровых крышках моделей как с маслом Т-750, так и марки ГК за время испытаний на стенде длительных испытаний (СДИ) образуется желто-бурый осадок. Интенсивность осадка с ростом температуры увеличивается. При 70° С осадка практически

не наблюдалось, при 90° С появлялся осадок желто-бурого цвета, а при 110 °С – коричневый.

В табл. 1.4 приведены результаты испытаний моделей марок Т-750 и ГК (по 24 модели для каждого масла) при температуре 90° С и средней напряженности 4.5 кВ/мм, сгруппированные по признаку интенсивности осадка.

Т а б л и ц а 1.4

Результаты испытаний моделей с маслами марок Т-750 и ГК

Масло	Визуальная интенсивность осадка на нижней крышке	Число моделей	tg δ, %		Влагосодержание масла
			изоляции	масла	
Т-750	Сильная	15	0.35/0.71	0.44/4.6	5.0/15.2
	Средняя	5	0.38/0.95	0.44/14.2	5.0/19.3
	Слабая	4	0.33/0.86	0.44/7.75	5.0/20.5
	Отсутствует	0	–	–	–
ГК	Сильная	0	–	–	–
	Средняя	5	0.3/0.42	0.04/2.1	3.6/9.1
	Слабая	7	0.3/0.53	0.04/4.8	3.6/12.0
	Отсутствует	12	0.34/0.87	0.04/3.58	3.6/15.0

Примечания.

1. Приведены средние значения tg δ и влагосодержания.
2. Числитель – первоначальные данные; знаменатель – после старения в течение 1000 ч.
3. Измерения tg δ изоляции проводились для моделей в собранном виде с заземленного фланца, на который выведена последняя обкладка остова. В измеренную величину tg δ изоляции входят диэлектрические потери как собственно изоляционного остова, так и фарфора с маслом.

Кроме того, проводили испытания других марок масел. На основании полученных результатов построена диаграмма (рис. 1.3), характеризующая в условных единицах оценку интенсивности осадка для раз-

личных масел при следующих условиях испытаний: $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $E_{\text{cp}} = 4.5\text{ кВ/мм}$, $t = 1000\text{ ч}$. На интенсивность осадка, как показали испытания, большое влияние оказывает групповой состав масел.

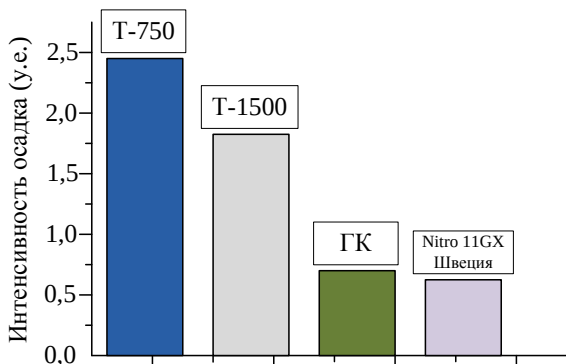


Рис. 1.3. Диаграмма изменения интенсивности осадков в трансформаторном масле типовой подстанции

В табл. 1.5 представлены характерные результаты химического анализа осадков из моделей и вводов, выполненного в Физико-химическом институте им. Карпова и ВНИИНП. Отсюда следует, что

Т а б л и ц а 1.5

Результаты химического анализа осадков из моделей и вводов

Осадок		Zn	Al	Si	S	Cl	Ca	Fe	Cu	K
Из ввода 150 кВ после девяти лет эксплуатации	собиран с нижней крышки	+	++	+++	+++	++	++	++	++	+
	выделен фильтрацией масла	+	++	+	+++	—	+	+	++	—
Собиран с нижней крышки ввода 110 кВ после шести лет эксплуатации		+	++	+	+++	—	—	+	++	—
Собиран с нижней крышки модели после испытаний на СДИ		+	—	+	+++	++	+	+	++	+

по составу осадки содержат много серы, которая находилась либо в самом масле, либо вымывалась из резины, используемой во вводах и моделях в качестве уплотнений. Входной контроль заливаемого масла в модели не выявлял в нем содержания серы. Для установления факта взаимодействия масла с резиной были проведены специальные опыты, в которых искусственно исключался непосредственный контакт отдельных конструкционных материалов с маслом. Результаты данных испытаний приведены в табл. 1.6.

Т а б л и ц а 1.6

Результаты испытаний

Масло – бумага – резина (исключена латунь)	Осадок слабой интенсивности
Масло – бумага – латунь (исключена резина)	Осадок отсутствует, следы осадка в виде потеков только в местах неплотной замотки резины
Масло – бумага (исключены латунь и резина)	Осадок отсутствует
Латунь – резина (исключена бумага, площадь соприкосновения латуни с маслом значительно увеличена)	Осадок сильной интенсивности

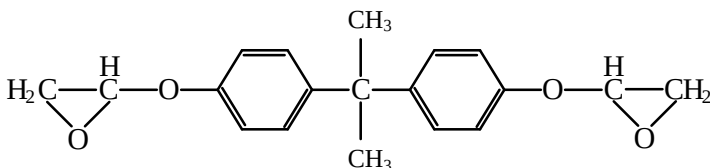
Испытания масла с образцами различных марок резины показали, что только с резиной на основе фторсиликоновых каучуков получены удовлетворительные результаты. Масло также в процессе длительного старения дает осадок, интенсивность которого зависит от группового состава масел.

Результаты испытаний подтвердили, что образование и отложение осадка на фарфоровых крышках связано с процессами старения масла из-за взаимодействия с резиной в присутствии медьсодержащих материалов, а не с конструктивными особенностями высоковольтных вводов и технологическими отклонениями при покрытии деталей лаком и грунтом. Испытания моделей подтвердили целесообразность применения масла ГК и Nitro 11 GX для высоковольтных вводов.

1.4.3. Эпоксидный компаунд

На основе эпоксидных компаундов можно получить материалы с высокой химической и тепловой стойкостью, хорошими электрическими и механическими свойствами, хорошей адгезией к различным материалам. В процессе отверждения эпоксидных смол не выделяются ни вода, ни летучие продукты, усадка меньше, чем в случае применения фенольных или полиэфирных смол. Эпоксидные смолы разнообразны и доступны, поэтому они широко применяются как электроизоляционные материалы и при производстве RIP-изоляции высоковольтных вводов в составе пропиточных компаундов.

Эпоксидные смолы имеют две и более эпоксидные группы в молекуле. Молекула стандартной эпоксидной смолы (диглицидиловый эфир бисфенола А) имеет следующее строение:



Применение полифункциональных отвердителей, содержащих также две и более функциональные группы, способные реагировать с эпоксидными группами, позволяет получать при отверждении реактопласты – полимерные материалы с пространственно сшитой структурой. Такие материалы нельзя расплавить, вязкотекучее состояние для них невозможно. Они могут существовать только в стеклообразном («твердом») и высокоэластичном («размягченном») состояниях. Переход из одного состояния в другое возможен при достижении температуры, называемой температурой стеклования (T_g). Это важный показатель свойств реактопластов.

В области T_g происходит скачкообразное изменение большинства механических и электрических свойств:

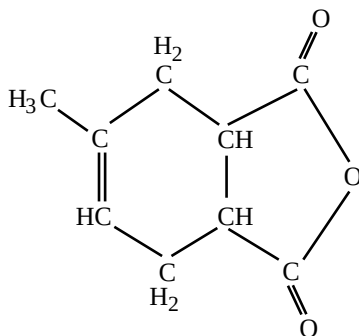
- уменьшается механическая прочность, прочность на разрыв снижается на 10...20 %;
- уменьшается модуль упругости (модуль Юнга);
- увеличивается удельная теплоемкость;
- увеличивается коэффициент линейного теплового расширения;

- увеличиваются тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$) и диэлектрическая проницаемость (ϵ).

По T_g можно определить полноту отверждения компаунда и, соответственно, корректировать продолжительность или условия процесса полимеризации. Большинство отвержденных эпоксидных смол имеют T_g выше 100°C .

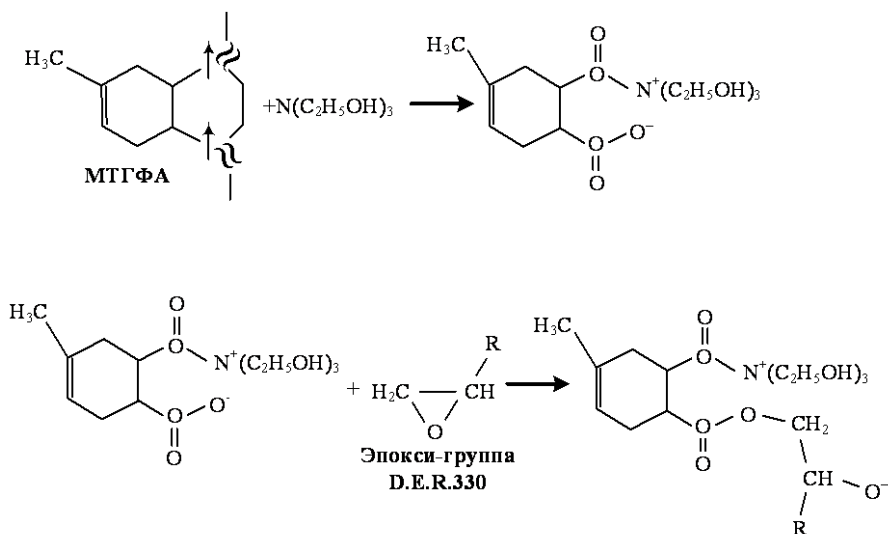
В качестве отвердителей эпоксидных смол в составе пропиточных компаундов используют ангидридные отвердители. Их применение обеспечивает большое время жизни компаундов и меньшую экзотермию в процессе отверждения; получаемые при этом материалы имеют стабильные электроизоляционные свойства даже при повышенных температурах (до 150°C) по сравнению с аминными отвердителями. Большое время жизни компаундов с ангидридами связано с их «низкой» активностью.

Низкая активность ангидридов в реакции отверждения, а также необходимость использовать их в относительно больших количествах (70...100 частей на 100 частей смолы) позволяет перерабатывать компаунды при высоких температурах, вязкость при этом значительно снижается, а их пропитывающая способность сильно увеличивается. Наибольшее применение при изготовлении электрической изоляции нашли метилтетрагидрофталевый (МТГФА) и метилнадиловый ангидриды. Структура молекулы отвердителя эпоксидных смол МТГФА имеет следующий вид:



Для повышения активности ангидридных отвердителей используют ускорители – протонсодержащие соединения (кислоты, спирты, фенолы, вода) или основания Льюиса, которые способствуют раскрытию ангидридного кольца. При введении только 0.5 % ускорителя

1-метилимидазола время желатинизации при 40 °С составляет 30 часов, а при 90 °С – не более 50 мин. Реакцию взаимодействия эпоксидов с ангидридами можно представить следующей схемой:



На первой стадии под воздействием третичного амина происходит раскрытие ангидридного цикла, что возможно при отсутствии ускорителя только при очень высоких температурах. На второй стадии образовавшиеся новые функциональные группы взаимодействуют с эпоксидами.

Для получения в процессе полимеризации материалов с нужными свойствами необходимо опытным путем подобрать соотношение эпоксидная смола – ангидридный отвердитель – ускоритель. Процесс отверждения эпоксидных смол ангидридами наименее экзотермичен, но при изготовлении крупногабаритных толстостенных изделий, когда теплоотдача от полимеризуемого компаунда затруднена, возможны значительные перегревы. Это приводит к возникновению больших внутренних напряжений в отвержденном материале и, как следствие, к возможному его растрескиванию под нагрузкой (механической или тепловой).

Для получения высококачественных (прочных и стабильных во времени) материалов необходимо правильно подбирать режим полимеризации. При подборе режима полимеризации используют метод дифференциально сканирующей калориметрии (ДСК). Процесс отвер-

ждения эпоксидных смол необходимо проводить с наименьшей скоростью, когда после возникновения новой связи переход образовавшейся молекулы в энергетически выгодное состояние наиболее вероятен (энергия системы понижается). Образующийся при этом материал отличается повышенной прочностью из-за правильного строения полимерной сетки и имеет меньшее внутреннее напряжение. При большой скорости процесса возникают значительные внутренние напряжения, а после каждого элементарного акта реакции полимеризации вновь образующиеся связи не успевают перестроиться, хаотическое пространственное расположение и дефекты фиксируются и образующийся материал подвержен растрескиванию.

При резких перепадах температур или механической обработке изделия из эпоксидных смол могут растрескиваться, разрушаться из-за значительных внутренних напряжений, которые добавляются к внутренним напряжениям, возникающим в процессе отверждения при усадке. Поэтому при изготовлении крупногабаритных изделий в эпоксидный компаунд вводят наполнитель. Это позволяет снизить экзотермический эффект процесса отверждения, усадку, уменьшить внутренние

Т а б л и ц а 1.7

Свойства отвержденного эпоксидного компаунда на основе смолы D.E.R. 330 (DOW Chem) и ангидридного отвердителя в чистом виде и с наполнителем

Показатель	Значение для отвержденного компаунда		Стандарт
	в чистом виде	RIP-изоляция	
Плотность, г/см ³	1.20...1.24	1.27...1.30	DIN 53479
Прочность на разрыв, МПа	60...70	85...90	ISO-527
Модуль упругости при растяжении, МПа	2500...3000	4500...5000	ISO-527
Температура стеклования, °C	140	140	ДСК
Коэффициент линейного теплового расширения, · 10 ⁻⁶ К	60...70	40...50	DIN 53462
Диэлектрическая проницаемость при 50 Гц и 25 °C	3,3	4,0...4,5	DIN 53483
Тангенс угла диэлектрических потерь при 50 Гц и 25 °C	0,005	0,005	DIN 53483

напряжения, модифицировать отдельные свойства получаемого материала. В табл. 1.7 приведены свойства отвержденного эпоксидного компаунда на основе смолы D.E.R. 330 (DOW Chem) и ангидридного отвердителя в чистом виде и с наполнителем. Для композиционного материала (RIP) используется крепированная бумага, пропитанная компаундом.

1.4.4. Элегаз

Элегаз, или шестифтористая сера SF_6 , обладает таким сочетанием свойств, которое делает его привлекательным для использования в качестве изоляционной среды в оборудовании с номинальным напряжением от 110 до 1150 кВ. Электрическая прочность элегаза примерно в 2.5 раза выше прочности воздуха. При увеличении давления электрическая прочность элегаза возрастает почти пропорционально давлению и может быть выше прочности жидких и некоторых твердых диэлектриков. Наибольшее рабочее давление и, следовательно, наибольший уровень электрической прочности элегаза в изоляционной конструкции ограничиваются возможностью сжижения элегаза при низких температурах.

В целях уменьшения габаритов элегазовых конструкций при конструировании высоковольтных вводов стремятся обеспечить наибольшую однородность электрического поля изоляционных промежутков. Электрическая прочность изоляционных газовых промежутков в высоковольтных конструкциях зависит от следующих факторов:

- давления (плотности) и влажности газа;
- коэффициента неоднородности поля в промежутке;
- площади поверхности электродов с большой напряженностью поля;
- шероховатости поверхности электродов;
- чистоты изолирующего газа в отношении механических, особенно проводящих, частиц;
- рода воздействующего напряжения.

Для слабо неоднородных электрических полей, что характерно для конструкций вводов, разрядная напряженность не зависит от степени неоднородности поля. Зависимости средних разрядных напряженностей ($E_{\text{ср}}$) от давления газа для различных площадей поверхности электродов при воздействии одноминутного напряжения промышленной частоты 50 Гц ($U_{1 \text{ мин } 50 \text{ Гц}}$), коммутационного или грозового импульса приведены на рис. 1.4 и 1.5.

Допустимая расчетная напряженность электрического поля определяется из рис. 1.4 и 1.5 по средней разрядной напряженности по формуле

$$E_{др} = 0.9E_{ср}(1 - 3\sigma). \quad (1.2)$$

При давлениях элегаза 0.3...0.4 МПа и воздуха 1...0.4 МПа для одноминутного напряжения промышленной частоты и коммутационного импульса стандарт отклонения σ принимается соответственно 0.03 и 0.1, а для напряжения грозового импульса – 0.05 и 0.1.

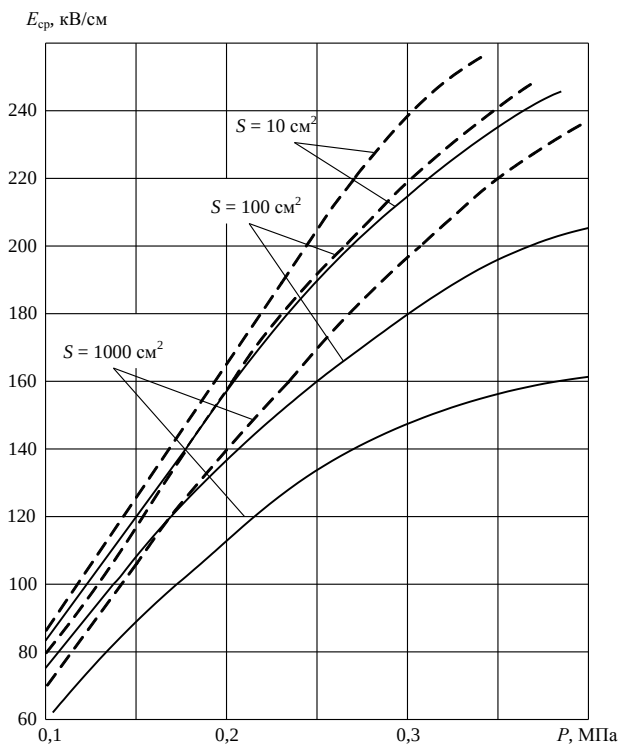


Рис. 1.4. Зависимость средней разрядной напряженности $E_{ср}$ элегазовой изоляции от давления для различных значений площади электродов S :

сплошные кривые – для напряжения промышленной частоты 50 Гц; штриховые – для грозового импульса 1,2/50 мкс

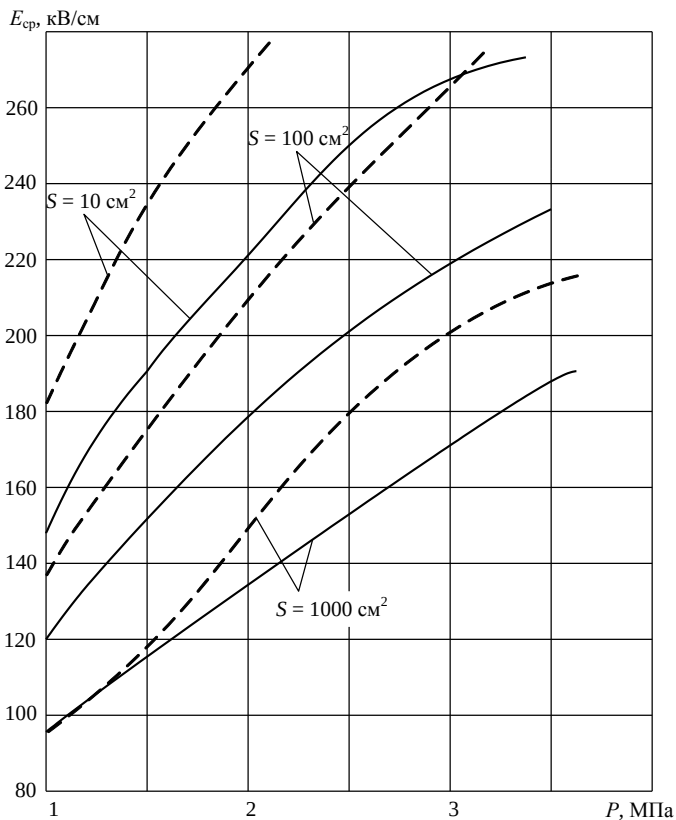


Рис. 1.5. Зависимость средней разрядной напряженности $E_{ср}$ воздушной изоляции от давления для различных значений площади электродов S :

сплошные кривые – для напряжения промышленной частоты 50 Гц;
штриховые – для грозового импульса 1,2/50 мкс

При давлениях элегаза 0.3...0.4 МПа для электродов с шероховатостью поверхности $R_a = 1.25$ мкм при одноминутном напряжении промышленной частоты и коммутационном импульсе величину $E_{др}$ следует брать больше, чем $R_a = 40$ мкм, на 15 % для площади поверхности электродов $S = 1000 \text{ cm}^2$ и на 5 % для $S = 10 \text{ cm}^2$. При напряжении грозового импульса эти значения равны соответственно 10 и 5 % (R_a –

средняя величина абсолютных отклонений профиля поверхности от средней линии, т. е. средняя высота микровыступов).

Соотношение между допустимой напряженностью при коммутационном импульсе и при одноминутном напряжении промышленной частоты равно 1.05.

Площадь расчетной поверхности (напряженная площадь) при использовании данных, приведенных на рис. 1.4 и 1.5, должна определяться как площадь поверхности, напряженность на которой не менее 90 % от максимальной. При площади поверхности электродов больше 1000 см² средняя разрядная напряженность практически не зависит от ее значения.

В конструкторском документе КД 16 053-83 «Вводы переменного тока газонаполненные на напряжение от 35 до 500 кВ. Расчет электрической прочности изоляции» описан выбор конфигурации и габаритов элементов промежутка токоведущая труба – заземленный фланец, электрическая прочность которого определяет внутреннюю электрическую прочность ввода как электрического аппарата. Ввод имеет нижнюю крышку, для крепления которой к токоведущей трубе необходим специальный опорный фланец. В целях снижения напряженности этот фланец должен быть определенной формы или на фланец должен надеваться специальный экран. Конфигурация опорного фланца (экрана) и форма крышки должны исключать развитие разряда вдоль поверхности твердого диэлектрика. Поэтому точка, напряженность в которой максимальна, должна находиться на наружной поверхности фланца.

1.4.5. Фарфор

Керамические массы, из которых изготавливаются различные изоляционные детали, представляют собой пластичные, легко формующиеся вещества. Это свойство пластичности сообщают сырой массе глинистые вещества, входящие в ее состав. После обжига (термической обработки) при высоких температурах (1300...1400 °С) все керамические материалы становятся твердыми телами.

Одним из представителей этой группы материалов является электротехнический фарфор. Он получил большое применение вследствие его незначительной гигроскопичности, стойкости к различным атмосферным воздействиям и электрическим дугам, а также достаточно высоких диэлектрических характеристик и мало заметного старения.

В сырую фарфоровую массу входят следующие компоненты:

- глинистые материалы (каолин и глины) ~ 50 %;

- кварц ~ 25 %;
- калиевый полевой шпат ~ 25 %.

Кроме того, в фарфоровую массу входят молотый фарфоровый черепок, т. е. доведенные до порошкового состояния куски фарфора, получаемого из бракованных изделий. Материалы для фарфоровых масс в химическом отношении представляют собой различные силикаты, т. е. природные соли кремниевой кислоты (H_2SiO_3). Каолин и другие глины представляют собой силикаты состава $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, калиевый полевой шпат имеет состав $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$.

Кварц представляет собой окись кремния – кремнезем SiO_2 , содержание которого в кварце около 98 %. Обожженный фарфор состоит из кристаллов муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), пространство между которыми заполнено стеклом.

Основные характеристики электротехнического фарфора приведены в табл. 1.8.

Т а б л и ц а 1.8

Основные характеристики электротехнического фарфора

Показатель	Единица измерения	Значение
Плотность ρ	г/см^3	2.5
Предел прочности: при растяжении σ_p сжатии σ_c изгибе σ_n	МПа	35 350...500 70
Модуль упругости E	МПа	60 000
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	Вт/м·К	1
Коэффициент линейного расширения α	1/К	$4.5 \cdot 10^{-6}$
Удельное объемное сопротивление ρ_v : при 20 °С при 100 °С	Ом·см	$10^{14} \dots 10^{15}$ $10^9 \dots 10^{10}$
Диэлектрическая проницаемость ϵ	о.е.	5...6
Удельное поверхностное сопротивление глазурированного фарфора при 20 °С ρ_s	Ом	$10^{12} \dots 10^{14}$
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$: при 50 Гц при 10^6 Гц	о.е.	0.015...0.025 0.009...0.012
Электрическая прочность $E_{пр}$ при 50 Гц	кВ/мм	15...20

1.4.6. Стеклопластик

Стеклопластики состоят из стекловолоконистого армирующего наполнителя и связующего на основе термореактивных полимеризующихся смол или компаундов. В высоковольтных изоляционных конструкциях применяется в основном стеклопластиковая изоляция однонаправленной ориентации. В стеклопластиках этого типа в качестве наполнителя употребляются стеклонити или стекложгуты однонаправленной ориентации. Главными факторами при изготовлении стеклопластиковых композиционных материалов являются:

- вид смолы, модификатора и отвердителя;
- тип стекла и тип его поверхностной обработки;
- технология изготовления и цикл полимеризации.

Широкое распространение получили связующие на основе эпоксидных смол и компаундов на их основе. Большинство эпоксидных смол представляют собой продукты взаимодействия эпихлоргидрина (диановые эпоксидные смолы) или дихлоргидрина глицерина с резорцином или дифенилолпропаном.

В качестве отвердителей могут служить амины, амиды или ангидриды органических кислот, синтетические смолы типа фенольно-формальдегидной. Оптимальные электрические и механические свойства стеклопластика для высоковольтных конструкций на основе эпоксидных связующих получаются при стехиометрическом соотношении отвердителя и смолы.

Стеклопластики на основе силиконовых резин и циклоалифатических эпоксидных смол имеют улучшенные свойства. У таких смол эпоксидная группа находится в самом циклическом ядре. По сравнению с обычными эпоксидными смолами циклоалифатические обладают более высокой стойкостью к действию дуги и короны, образованию трека, меньшей вязкостью, более продолжительным сроком возможного использования, мягким режимом отверждения, лучшей стойкостью к атмосферным воздействиям.

Стекло, используемое в композиции, определяет механические свойства слоистой структуры стеклопластика, поэтому выбор стеклянных жгутов и их поверхностной обработки является важным фактором. Основные составляющие стекловолокна – нити, имеющие диаметр от 6 до 11 мкм. Нити группируются в жгуты, каждый из которых содержит обычно 60 сложений. Для производства стеклянного волокна наи-

более часто применяют бесщелочное алюмоборосиликатное стекло, значительно реже – щелочное, что связано с более высокими физико-механическими свойствами алюмоборосиликатного стекла.

Химический состав стекол в стеклонитях оказывает влияние как на свойства самих стекловолоконистых материалов, так и на свойства однопослойных стеклопластиков, изготавливаемых на их основе.

Наличие в составе щелочных стекол щелочноземельных и щелочных силикатов приводит к низким электроизоляционным характеристикам стеклопластиков.

Стеклонити покрываются специальными замасливателями, чтобы они имели необходимое сцепление между собой перед обмоткой на бобину. В качестве замасливателя применяют парафиновую эмульсию и декстриновый клей. Замасливатели в обязательном порядке удаляются из стеклонитей путем прогрева при температурах 300...500 °С, так как они дают большой угол смачивания и резко ухудшают пропитку.

Из стеклонитей и связующего методом непрерывной протяжки (пултрузии) на специальных устройствах получают профильные изделия различной формы поперечного сечения – прямоугольники, уголки, тавры, швеллеры, цилиндры, трубки и т. п. Процесс получения стеклопластиковых стержней заключается в следующем (рис. 1.6).

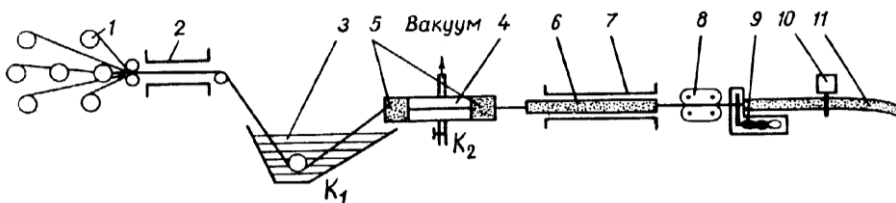


Рис. 1.6. Технологическая схема непрерывной протяжки стеклопластикового стержня с повышенными электроизоляционными свойствами при использовании вакуумной камеры:

1 – бобина стекловолокна; 2 – зона сушки жгута; 3 – ванна со связующим; 4 – вакуумная камера; 5 – фильтры; 6 – разъемная фильера; 7 – обогреватель фильеры; 8 – тянущее устройство; 9 – экструдер для покрытия стеклопластика; 10 – машина для резки стеклопластика; 11 – стеклопластик с покрытием

Количество жгутов определяется необходимым сечением стеклопластика. После термообработки пучок стекложгутов поступает в трехсекционную ванну, во время продвижения в которой стекловолоконно смачивается вакуумированным связующим. Устройство для ваку-

умирования состоит из трех камер, разделенных герметичными перегородками со специальными уплотняющими втулками для пропуска стекла. Умывальника.

При выходе из ванны пропитанные связующим стекложгуты уплотняются, проходя через специальную съемную фильеру, изготавливаемую из фторопласта. Диаметр фильеры или ее профиль соответствует геометрическим размерам изготавливаемой стеклопластиковой изоляции. Пройдя камеры полимеризации с установленными температурными режимами, стержень охлаждается в струе воздуха из вентилятора. Технологический процесс полностью автоматизирован. Скорость протяжки зависит от длины фильеры, поперечного сечения стеклопластика, температуры полимеризации и состава применяемого связующего, составляющего около 30 % от веса стеклопластика.

Для улучшения электромеханических свойств стеклопластика применяется несколько методов пропитки стекложгута и его полимеризации – вакуумная, ультразвуковая, с электростатическим и механическим распушением волокон, принудительное нагнетание связующего, натяжение стекложгута после его пропитки, пропитка стекложгута при высокой частоте. Изделия более сложной конфигурации из однонаправленного стеклопластика (например, ребристые элементы) изготавливают прессованием, методом пропитки под давлением и в вакууме, методом намотки, а также высокочастотной сваркой отдельных ребер. Существенно улучшает структуру стеклопластиков вакуумная технология их изготовления.

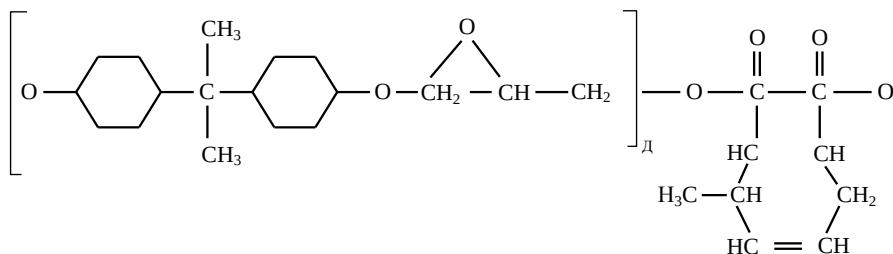
Стеклопластиковая изоляция является многокомпонентной системой, поэтому ее электрические свойства и возможность длительной работы зависят от физико-химических и электрических характеристик компонентов, в частности, их электрической прочности, а также от технологии изготовления стеклопластика. Изменение этих свойств во времени определяется интенсивностью и временем действия внешних факторов. Стеклопластики, особенно однонаправленные, обладают высокой удельной механической прочностью, превышающей прочность стали. Электрические свойства и стойкость стеклопластиков к атмосферным воздействиям во многом определяются свойствами применяемого связующего.

Электроизолирующие свойства стеклопластиковой изоляции в значительной степени зависят от влажности, что определяет необходимость предупреждения проникновения влаги внутрь стеклопластика или значительного уменьшения ее влияния на изоляцию. При этом

следует отметить, что влагозащитное покрытие должно быть также трекинго- и дугостойким. Стеклопластиковые элементы в чистом виде не удовлетворяют требованиям трекинго- и дугостойкости. Кроме того, происходит ухудшение электрических характеристик стеклопластика в результате сорбции влаги.

Герметизация стеклопластика полимерными материалами не гарантирует бессрочного сохранения им исходным свойств, однако использование материалов, обладающих низкими коэффициентами диффузии влаги и влагопроницаемости, несомненно, удлиняет срок службы и при соответствующей толщине покрытия может обеспечить рабочие свойства стеклопластика в течение всего периода эксплуатации.

Наилучшими показателями обладает стеклопластик, состоящий из 100 весовых частей эпоксидной смолы ЭД-20 и 77 весовых частей изометилтетрагидрофталяевого ангидрида (отвердителя):



В табл. 1.9 приведены электрические характеристики стеклопластиков круглого сечения диаметром 8...15 мм, полученных методом непрерывной протяжки на основе различных связующих.

1.4.7. Кремнийорганические полимеры

Наибольшее применение в качестве покрытий получили композиции на основе кремнийорганической резины. Кремнийорганические полимеры (КП) – это материалы XXI века, так как обладают целым рядом уникальных свойств: работоспособностью в интервале температур от – 80 до + 260 °С, высокими электроизоляционными характеристиками, атмосферостойкостью, стойкостью к ультрафиолетовому и инфракрасному излучениям, воде, озону и воздействию микроорганизмов. В кремнийорганических полимерах молекулы содержат атомы кремния и углерода в составе элементарного звена. Они отличаются от органических тем, что в них углеродный скелет заменен цепью или

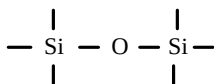
Т а б л и ц а 1.9

Электрические характеристики стеклопластиков различных составов

Характеристика	Полиэфирная смола ПН-1-(100)+ ПБ-(0,6)	Эпоксидная смола ЭД-20-(30)+ полиэфирная смола ПН-3-(60)+ НА-9+ПБ-(0,6), покрытие из полиметилметакрилата	Эпоксидная смола ЭД-20-(30)+ ненасыщенная полиэфирная смола НПС-609+ ИЗО-МТГФА-(75)+ ПБ-(0,6)	Эпоксидная смола ЭД-20-(100)+ дициандиамина ДЦ	Эпоксидная смола ЭД-20-(100)+ ИЗО-МТГФА-(75)+ ХОС-(10), безвакуумная технология с эпокси-фторопластовым покрытием	Эпоксидная смола ЭД-20-(100)+ ИЗО-МТГФА-(75)+ ХОС-(10), вакуумная технология (без покрытия)
Сопротивление в исходном состоянии ($d = 12$ мм, $l = 50$ мм), Ом	$8 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{13}$	$9 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{13}$
Сопротивление после суточного увлажнения во влагокамере при 40 °С, Ом	$3 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^{10}$	$8,5 \cdot 10^{10}$	$4,5 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{13}$
Водопоглощение в течение суток при 20 °С, %	0,285	0,055	0,047	0,06	0	0,012
Электрическая прочность в исходном состоянии ($d = 12$ мм, $l = 10$ мм), кВ/см	18	23	28	17	37	58
Электрическая прочность после суточного увлажнения в воде при 20 °С, кВ/см	8	21	19	9	35	42
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц, %	0,08	0,054	0,047	0,062	0,04	0,036
Трекингостойкость, АСТМ, ч	3	100	30	8	200	70
Дугостойкость, с (по ГОСТ 10345-66)	13	50	12	6	100	18
Воздействие испытательного напряжения из расчета 4 кВ/см при $l = 50$ мм: – в исходном состоянии – после увлажнения	выдержал не выдержал	выдержал выдержал	выдержал выдержал	выдержал не выдержал	выдержал выдержал	

сеткой из чередующихся атомов кислорода и кремния, связанных, кроме этого, с органическими радикалами. Часто такие КП называют полиорганосилоксанами. В зависимости от строения главной полимерной цепи полиорганосилоксаны подобно другим полимерам подразделяются на линейные, разветвленные, циклолинейные (лестничные) и сшитые.

Неотвержденные КП растворимы в большинстве органических растворителей, но устойчивы к действию большинства кислот и щелочей. Разрыв силоксановой связи вызывают лишь концентрированные щелочи и концентрированная серная кислота. Полиорганосилоксаны характеризуются высокой термической стойкостью, что обусловлено высокой энергией и полярностью связи:



Органические радикалы у атома кремния стойки к термоокислению из-за поляризации связи: $-\text{Si}-\text{C}-$.

Термодеструкция полиметилсилоксанов начинается при 320...330 °С. Полиорганосилоксаны обладают высокими диэлектрическими характеристиками: при 20 °С тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ колеблется в пределах от $1 \cdot 10^{-4}$ до $7 \cdot 10^{-4}$, диэлектрическая проницаемость ϵ_r – от 2.9...3.1 у полиметилсилоксанов до 4.5...6.4 у олигометил-силоксанов (галогеноорганов), удельное объемное электрическое сопротивление ρ_v – от $(6-7)10^{16}$ Ом·м у полиметилсилоксанов до 0.003...0.4 Ом·м у галогеносодержащих олигосилоксанов.

Механическая прочность КП в сравнении с органическими полимерами невысока, однако достаточна при использовании их в качестве электроизоляционных и герметизирующих материалов.

Кремнийорганические полимеры применяют для производства различных электроизоляционных материалов, таких как пропиточные и проклеивающие лаки, компаунды, герметики, вазелины. Они используются в качестве связующих в производстве пластмасс (стеклопластиков, работающих при высоких температурах). Широко применяют в технике кремнийорганические каучуки и жидкости. Кремнийорганические компаунды и герметики на основе низкомолекулярных кремнийорганических каучуков широко используются в радиотехнической, электронной и электротехнической промышленности для изготовления изоляции.

В зависимости от назначения различают пропиточные, заливочные компаунды и герметики. Пропиточные компаунды должны иметь малую начальную вязкость и высокую пропитывающую способность, а заливочные – обладать вязкостью, обеспечивающей хорошее заполнение различных объемов.

По способу вулканизации кремнийорганические компаунды классифицируют следующим образом:

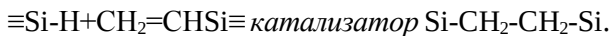
- материалы горячей вулканизации, которая протекает по радикально-цепному механизму (тип Н). К ним относятся компаунды на основе олиговинилорганосилоксанов, вулканизирующихся в присутствии органических перекисей;
- материалы холодной вулканизации, вулканизирующиеся при комнатной температуре за счет поликонденсационных реакций (РТ-тип). Обычно эти материалы подразделяют на одно- и двухкомпонентные.

В состав однокомпонентных компаундов холодной вулканизации входят низкомолекулярные силоксановые каучуки с гидроксильными группами по концам цепей: $\text{OHSiR}_2-(\text{OSiR}_2)_n\text{OH}$ и трехфункциональные сшивающие агенты типа R^-SiX_3 , где X – функциональная группа (карбоксильная, оксиамидная, амидная и др.). $\equiv\text{Si}-\text{X}$ группировки легко гидролизуются под действием атмосферной влаги, вызывая вулканизацию всей композиции. В результате образуются полимеры с пространственной сеткой только из силиконовых связей $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$. Эти компаунды могут долго храниться в герметических объемах и вулканизируются только при контакте с влагой воздуха.

Двухкомпонентные компаунды холодной вулканизации также состоят из низкомолекулярных органосилоксановых каучуков с гидроксильными группами. Но в качестве структурирующих систем в них используют тетра- и полифункциональные сшивающие агенты. Эти агенты сами по себе не обладают реакционной способностью по отношению к гидроксильным группам каучука. Их реакционная способность обеспечивается только за счет дополнительного введения катализаторов: карбоксилатов или алкоксидов Sn, Ti, Pb, Al. Эти компаунды для своей вулканизации не требуют влаги воздуха и вулканизируются только в присутствии катализаторов. Причем катализатор обычно добавляют в композицию на месте ее применения.

Материалы ускоренной вулканизации (ZTV-тип) вулканизируются с использованием реакции гидросилилирования или полиприсоединения. Полимерную основу таких компаундов составляют низкомолекулярные силоксановые каучуки, содержащие ненасыщенные связи

--C=C-- . К этим каучукам добавлен олигомер с $\equiv\text{Si--H}$ связями. Реакция гидросилилирования между ними протекает по схеме:



В результате образуется полимер с трехмерной пространственной структурой. Причем сшивание силоксановых цепей происходит группировками $\equiv\text{Si--CH}_2\text{--CH}_2\text{--Si}\equiv$.

В электротехнической, радиотехнической и электронной промышленности используются следующие марки компаундов: эластосил, ВИКСИНИТ, КЛ и др. Материалы холодной вулканизации типа «эластосил» используются как термо- и влагостойкие электроизолирующие заливочные компаунды. После отверждения они обеспечивают надежную изоляцию и защиту от проникновения влаги и агрессивных веществ. Работоспособность этих материалов сохраняется в интервале от -60°C до $+200\dots 250^\circ\text{C}$.

Герметики виксинт и компаунды КЛ холодного отверждения применяются для герметизации электрооборудования, работающего на воздухе и в условиях повышенной влажности в интервале температур от -60°C до $+250^\circ\text{C}$.

Компаунды КТЗ-I горячего отверждения и смолы МФВГ, которые относятся к материалам ускоренной вулканизации, также позволяют получать нагревостойкие покрытия с высокими электроизоляционными свойствами, сохраняющимися в условиях повышенной влажности.

В настоящее время в высоковольтной электротехнике широко применяются силиконовые компаунды и герметики (RTV2) серии ПЕНТЭЛАСТ®. По своим технологическим параметрам компаунды этой серии аналогичны компаундам силиконового типа ВИКСИНТ, но превосходят их по физико-механическим свойствам.

Свойства:

- диапазон рабочих температур от -90 до $+300^\circ\text{C}$;
- нечувствительны к воздействию кислорода воздуха, озона и ультрафиолетовым лучам (не «стареют» даже в весьма жестких условиях);
- обладают высокой износо-, влаго- и атмосферостойкостью, химической стойкостью;
- не вызывают коррозии металлов и сплавов, в том числе меди;
- совместимы с большинством заливочных материалов;
- при использовании подслоя (праймера) обладают хорошей адгезией к металлу, стеклу и керамике;
- отлично воспроизводят детали поверхности;
- стабильны во время работы.

В табл. 1.10 приведены основные характеристики компаунда виксинит У-4-21.

Т а б л и ц а 1.10

Основные характеристики компаунда виксинит У-4-21

Показатель	Значение
ρ , кг/м ³	1300...1400
$T_{\text{раб}}$, °С	– 60...+300
$T_{\text{хр}}$, °С	–65
σ_p , МПа исходный образец при 20 °С после теплового старения при 200 °С в течение 1000 ч после выдержки в течение 56 сут. в среде с относительной влажностью 95±3 % при 40 °С	2.0 1.6 1.5
$\epsilon_{\text{отн}}$, % исходный образец при 20 °С после теплового старения при 200 °С в течение 1000 ч после выдержки в течение 56 сут. в среде с относительной влажностью 95±3 % при 40 °С	100 100 160
Твердость по твердомеру ТИР, ед.	40...55
λ , Вт/(м·К)	0.32
ρ_v , Ом·см исходный образец при 20 °С при 200 °С после теплового старения при 200 °С в течение 1000 ч после выдержки в течение 56 сут. в среде с относительной влажностью 95±3 % при 40 °С	$5 \cdot 10^{13}$ $3 \cdot 10^{11}$ $5 \cdot 10^{14}$ $1 \cdot 10^{13}$
$\text{tg } \delta$ при 10^6 Гц исходный образец при 20°С при 200 °С после теплового старения при 200 °С в течение 1000 ч после выдержки в течение 56 сут. в среде с относительной влажностью 95±3 % при 40 °С	0.001...0.0016 0.027 0.0007 0,03

Показатель	Значение
ε при 10^6 Гц	4.2...4.7
исходный образец при 20 °С	3.9
при 200 °С	
после теплового старения при 200 °С в течение 1000 ч	4.9
после выдержки в течение 56 сут. в среде с относительной влажностью 95 ± 3 % при 40 °С	5.3
$E_{пр}$, МВ/м	10...20
исходный образец при 20 °С	14
после теплового старения при 200 °С в течение 1000 ч	
после выдержки в течение 56 сут. в среде с относительной влажностью 95 ± 3 % при 40 °С	10

При выборе материала покрышек ввода учитывают, для чего предназначен вывод для наружной или внутренней установки. Верхняя покрышка высоковольтных вводов наружной установки должна изготавливаться из фарфора или силиконового компаунда типа пентэласт. Для внутренней установки она может изготавливаться как из фарфора, так и из стеклопластика, если влажность не превышает 80 %. Нижняя покрышка вводов внутренней и наружной установок может быть фарфоровой или из эпоксидного компаунда.

Максимальное расчетное амплитудное значение допустимой напряженности для верхней покрышки из стеклопластика принимается равным 11 кВ/см для одноминутного переменного напряжения промышленной частоты и коммутационного импульса.

Максимальная расчетная допустимая напряженность на поверхности верхней покрышки из стеклопластика для грозового импульса принимается равной 15 кВ/см.

Для вводов 110 и 220 кВ величина максимальной расчетной допустимой напряженности верхней фарфоровой покрышки для коммутационного импульса равна 25 кВ/см, а для грозового импульса – 60...65 кВ/см.

Глава 2

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ

2.1. НАМОТКА И СУШКА БУМАЖНОГО ОСТОВА

Основной конструктивной частью ввода конденсаторного типа с БМИ или твердой RIP-изоляцией служит его изоляционный остов, который изготавливается из специальной изоляционной бумаги с последующей пропиткой трансформаторным маслом или эпоксидной смолой. При намотке в остов закладываются конденсаторные обкладки из алюминиевой фольги. Обкладки обеспечивают оптимальное распределение напряжения. Намотка остовов для вводов с БМИ производится из кабельной бумаги, а для вводов с RIP-изоляцией – крепированной бумаги, которая имеет высокую пористость, что обеспечивает пропитку эпоксидным компаундом, имеющим большую вязкость.

Намотка остова на трубу осуществляется на специальном оборудовании с контролем натяжения бумаги для получения заданной плотности. Перед намоткой бумага должна быть высушена до необходимой влажности. Комплекты конденсаторных обкладок готовятся в помещении, уровень требований к климату которого выше, чем в сборочном цехе.

После намотки остов помещается в сушильную камеру.

2.2. БУМАЖНО-МАСЛЯНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

Схема технологических этапов изготовления вводов с БМИ конденсаторного типа приведена на рис. 2.1.

Остов, извлеченный из сушильной камеры, комплектуется деталями (узлами крепления, экранами и т. д.). До сборки он должен находиться в цехе в открытом виде не более 2 ч, пока его температура превышает температуру окружающей среды. После сборки ввод подвергается вакуумной обработке и пропитке трансформаторным маслом. Параметры термовакuumной обработки (ТВО) обеспечивают высокую надежность длительной работы изоляции при эксплуатации ввода.



Рис. 2.1. Технологическая схема изготовления изоляции типа БМИ

2.3. ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОСТОВА RIP-ИЗОЛЯЦИИ

Принципиальная технологическая схема изготовления ввода с RIP-изоляцией приведена на рис. 2.2.

Пропитывающая смола готовится на специальной установке с обязательным контролем состава, вязкости и других параметров для каждой партии. После пропитки и полимеризации остов подвергается нагреву в соответствии с определенным температурным режимом для снятия остаточных механических напряжений.

Особую важность имеет контроль над соблюдением технологии изготовления на всех стадиях производственного цикла (рис. 2.3).

Состав компаунда и технологические режимы являются гарантией сохранения высоких диэлектрических свойств основной RIP-изоляции



Рис. 2.2. Технологическая схема изготовления ввода с RIP-изоляцией

остовов при длительных сроках эксплуатации. Тщательный контроль соблюдения технологических режимов в процессе сушки, пропитки, а также во время цикла отверждения обеспечивает постоянно высокое качество изоляционных остовов для обесточения уровня частичных разрядов и механических характеристик.

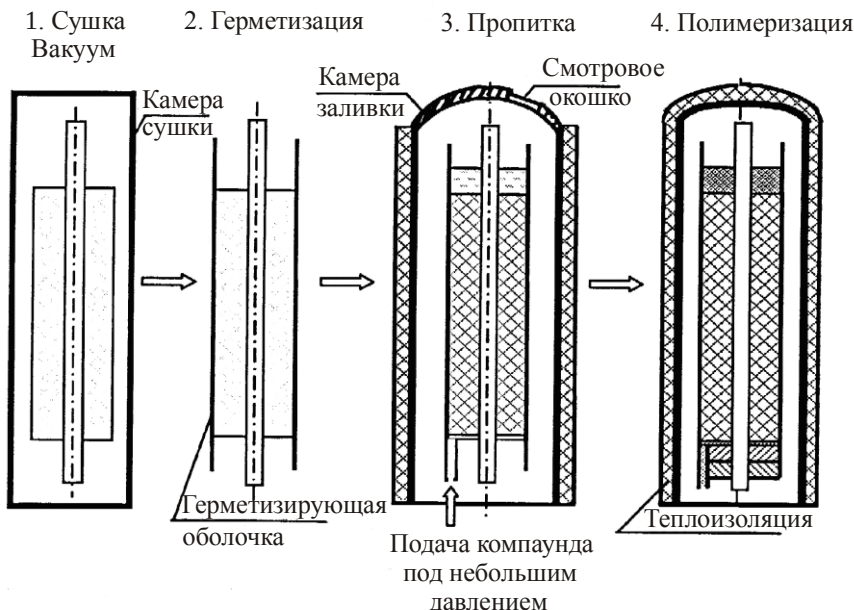


Рис. 2.3. Основные операции при изготовлении RIP-изоляции

После окончания цикла полимеризации изоляционному остову придается необходимая форма путем обработки на токарном станке. Фиксацию соединительной втулки на остоле производят методом горячей прессовой посадки, при которой в холодном состоянии посадочный диаметр меньше диаметра остова на 0,3 мм. После нагрева до 300 °С втулку насаживают на остов и охлаждают до температуры окружающей среды. Затем на остов устанавливают фарфоровую покрывку или наносят полимерную внешнюю изоляцию.

Конструкции вводов максимально унифицированы. Для твердой изоляции особенно важен учет размерного фактора. В RIP-изоляции как в композиционном материале на механическую прочность влияют соотношение бумага (наполнитель) – эпоксидная смола (пропитывающий состав). После полимеризации и отверждения изоляционному остову придают определенную форму путем токарной обработки. Особую важность имеют подбор состава компаунда и контроль соблюдения технологии изготовления на всех стадиях производственного цикла. Тщательный контроль соблюдения технологических режимов в процессе

сушки, пропитки и полимеризации обеспечивает высокое качество получаемой изоляции в отношении уровня частичных разрядов и механических характеристик.

При достаточно известных принципиальных решениях современные разработки RIP-изоляции касаются выбора конкретных рецептур, технологических режимов и приемов, т. е. того, что обычно относят к секретам производства. Практическое воплощение известных принципиальных решений до сих пор сопряжено с преодолением затруднений, связанных с недостаточной изученностью природы используемых процессов и материалов. В настоящее время серийно выпускаемые высоковольтные вводы с RIP-изоляцией являются лучшим видом проходных изоляторов как с точки зрения характеристик изоляции, так и эксплуатационных издержек и экологии.

Практически все сведения о RIP-изоляции являются коммерческим секретом фирм-изготовителей 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 (вакуумная сушка, герметизация, пропитка, полимеризация).

Допустимые значения напряженностей являются основой электрических расчетов RIP-изоляции. Определение допустимых значений рабочих напряженностей во внутренней изоляции ($E_{\text{раб доп}}$), т. е. 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.

Важнейшей стадией процесса изготовления RIP-изоляции является отверждение, во время которого возможна большая усадка изделия. Для предотвращения возможных деформаций и растрескивания выдерживается определенное соотношение между наполнителем (крепированной бумагой) и компаундом. В состав компаунда могут вводиться в экспериментально определенных пропорциях модификаторы. Кроме того, при изготовлении изоляционных остовов на напряжение 220 кВ могут эффективно использоваться эластичные материалы в качестве демпфирующего слоя между центральной трубой и изоляционной бумагой.

В RIP-изоляции конденсаторного типа соотношение допустимых напряженностей при разных воздействующих напряжениях (рабочее, допустимое испытательное при 50 Гц, грозовой импульс стандартной формы) будет существенно иным, чем у БМИ. Это относится к уровню допустимых импульсных напряженностей. Частичные разряды в RIP-изоляции будут вызывать микроповреждения (микрополости), которые не могут, как пузырьки в масле, самоликвидироваться. Поэтому допустимая напряженность должна соответствовать минимальной напряженности, при которой в RIP-изоляции возникали частичные разряды под действием грозового импульса напряжения.

Глава 3

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ

3.1. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ (САПВВ)

При проектировании высоковольтных вводов последовательно решаются задачи структурной и параметрической оптимизации большого числа вариантов конструкций. На рис. 3.1 приведена общая схема проектирования, которая включает:

- прием и обработку входных параметров;
- поиск оптимальной конструкции ввода;
- конструирование с учетом готовой базы унифицированных узлов и деталей;
- поверочный расчет;
- выдачу технической документации (чертежей и отчетных материалов по результатам расчетов).

Проектирование вводов производится в условиях жестких ограничений по габаритам, электрической прочности, температурам нагрева, электродинамической стойкости, технологичности конструкции.

При конструировании обычно бывают заданы длина нижней части ввода и необходимый размер $L_{\text{т}}$ под трансформатор тока и (или) заземленные детали. При этом накладываются ограничения на длину последней, ближайшей к фланцу заземляемой уравнивающей обкладки,

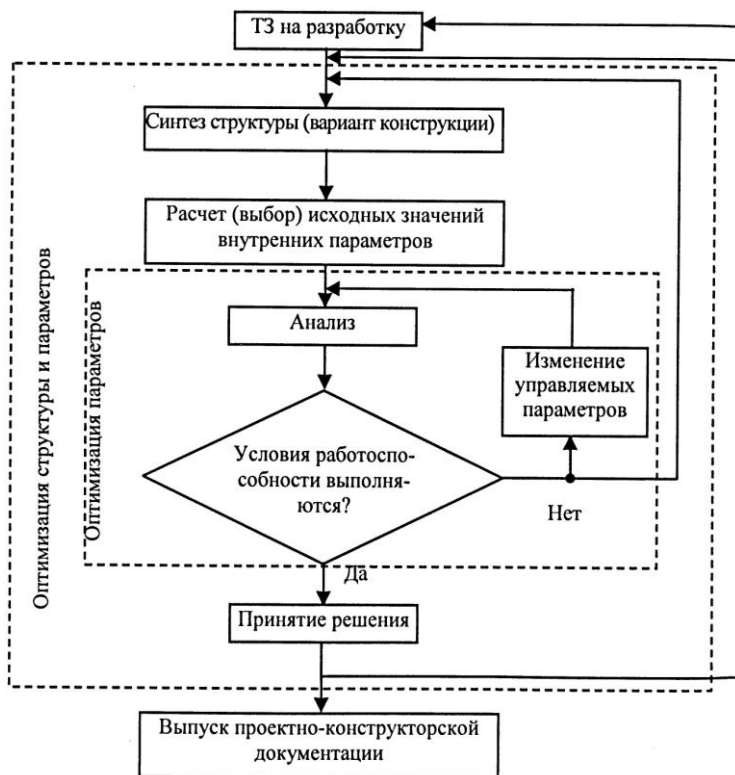


Рис. 3.1. Общая схема проектирования

которая не должна быть короче соединительной втулки с учетом размера встроенного трансформатора тока (рис. 3.2).

Край заземляемой обкладки должен выходить за пределы втулки, благодаря чему напряженность электрического поля уменьшается у краев втулки, что предотвращает коронирование. Радиус первой обкладки не может быть меньше радиуса центральной трубы, величина которого ограничена по условию нагрева и механической прочности.

Длина верхней покрышки определяется разрядными характеристиками при ее нормированном загрязнении и увлажнении при воздействии испытательных напряжений.

Внутренний диаметр покрышки со стороны соединительной втулки выбирается по диаметру соединительной втулки, который, в свою

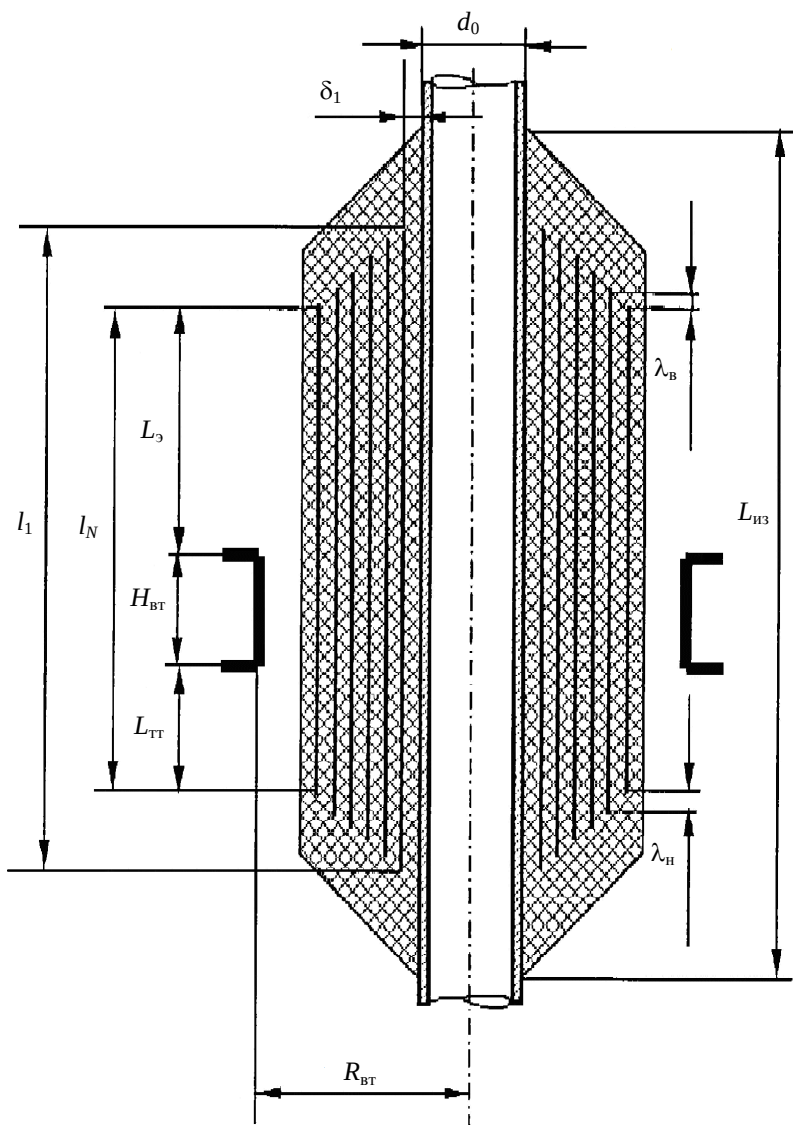


Рис. 3.2. Расположение обкладки в изоляционном остоле

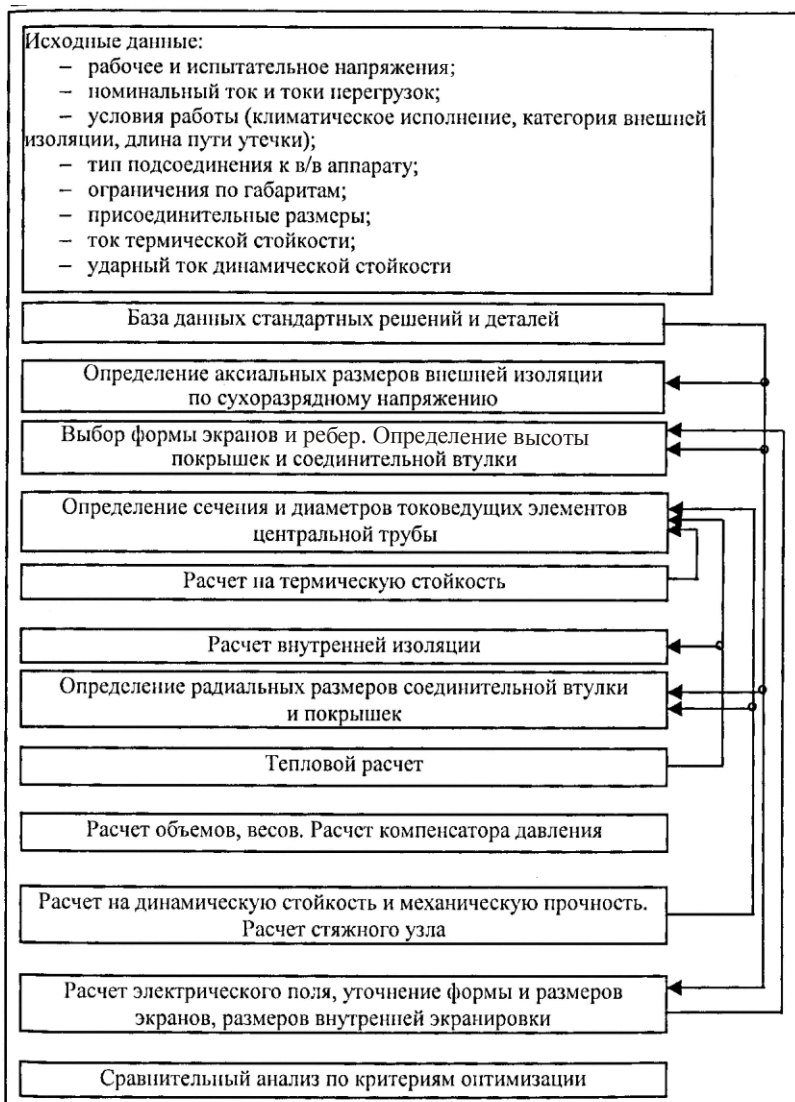


Рис. 3.3. Последовательность расчета и взаимосвязь между отдельными этапами в отдельной подсистеме САПР ВВ

очередь, выбирается по диаметру изоляционного остова с учетом зазора (канала) для протекания масла и обеспечения сборки ввода. Достаточность диаметра и сечения покрышки проверяется при механическом расчете.

Длины верхней и нижней покрышек связаны определенным образом с суммой уступов изоляционного остова с учетом размеров внутренней экранировки. Форма и размеры экрана выбираются и уточняются в процессе расчета электрического поля для данной среды по допустимой напряженности поля на его поверхности.

В изоляционном остове при испытательных напряжениях не должно быть критических и при рабочем напряжении начальных частичных разрядов. Величины радиальной и аксиальной напряженности электрического поля ограничены определенной величиной.

Давление во вводе не должно превосходить значения, определяемого как условиями механической прочности, так и отсутствием течи масла через уплотнения.

Все эти ограничения необходимо учитывать при конструировании высоковольтных вводов. Особенностью расчетного проектирования в систем автоматизированного проектирования высоковольтных вводов (САПР ВВ) является возможность расчета и оценки всех приемлемых вариантов проектных решений, сравнение их и выбор наиболее оптимального (рис. 3.3).

3.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Для регулирования (выравнивания) электрического поля в радиальном и аксиальном направлениях применяются уравнивательные обкладки, которые накладываются при намотке изоляции на определенных диаметрах. Вся система обкладок образует многослойный конденсатор, т. е. изоляцию конденсаторного типа. Количество обкладок, их диаметры и длины, толщины слоев и величины уступов по изоляции между обкладками на ЗАО «Мосизолятор» определяют с помощью расчетов на ЭВМ по следующей методике.

Основными исходными данными для расчета являются данные технического задания (ТЗ):

- номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$;
- номинальный ток $I_{\text{ном}}$;
- величины токов термической I_t и электродинамической стойкости I_d ;

- одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты $U_{1\text{мин } 50 \text{ Гц}}$;
- грозовой импульс стандартной волны 1.2/50 мкс положительной и отрицательной полярности $\pm U_{\text{п Г н}}$;
- коммутационный импульс стандартной волны 250/2500 мкс $U_{\text{к н}}$;
- импульс срезанной волны $U_{\text{с Г н}}$;
- одночасовое испытательное напряжение промышленной частоты $U_{1\text{час } 50 \text{ Гц}}$;
- длина нижней части ввода или длина ввода со встроенным трансформатором тока $L_{\text{т т}}$;
- размер от оси до заземленной стенки бака трансформатора.

Электрический расчет конструкции остова

Расположение обкладок в изоляционном остове схематично показано на рис. 3.2. Применяется три схемы расположения обкладок в высоковольтных вводах (см. таблицу).

Схемы расположения обкладок

Вводы с БМИ					Вводы с RIP-изоляцией	
$U_n \leq 220 \text{ кВ}$		Для вводов $U_n > 220 \text{ кВ}$ применяется комбинация схем 2 и 1				
Схема 1	$\lambda = \text{const}$	Схема 2	$\lambda = \text{var}$		Схема 3	$\lambda = \text{const}$
	$\delta = \text{var}$		$\delta = \text{const}$			$\delta = \text{const}$
	$E_\tau = \text{const}$		$E_r = \text{const}$	$E_r = \text{var}$		$E_\tau = \text{var}$
	$E_r = \text{var}$		$E_\tau = \text{var}$	$E_\tau = \text{const}$		$E_r = \text{const}$

Рациональной и оптимальной с точки зрения использования изоляции для вводов до $U_n \leq 220 \text{ кВ}$ является конструкция остова с постоянной аксиальной составляющей напряженности электрического поля.

Среднее значение радиальной напряженности в слое изоляции толщиной δ между обкладками определяется согласно выражению

$$E_r = \frac{\Delta U}{\delta} \leq E_{r \text{ доп}}, \quad (3.1)$$

где $E_{r \text{ доп}} = A\delta^{-0.58}$ – допустимая радиальная напряженность при частоте 50 Гц, кВ/мм. Величина A выбирается исходя из допустимого уровня частичных разрядов при испытательном или рабочем напряжении. Уровень частичных разрядов для изоляции конденсаторного типа в первую очередь определяется краевыми эффектами и зависит от плотности намотки и свойств пропиточного состава.

Для различных видов изоляции величина A имеет следующие значения:

а) при рабочем напряжении

$A_p = 3.6 \dots 4$ кВ/мм для БМИ изоляции;

$A_p = 1.6 \dots 1.8$ кВ/мм для RBP-изоляции;

$A_p = 4 \dots 6$ кВ/мм для RIP-изоляции;

б) при испытательном напряжении $U_{\text{исп 1 мин 50 Гц}}$, $U_{\text{исп 5 мин 50 Гц}}$

$A_n = 12 \dots 15$ кВ/мм.

Среднее значение аксиальной напряженности по уступу между обкладками определяется выражением

$$E_{\tau} = \frac{\Delta U}{\lambda} \leq E_{\tau \text{ доп}}, \quad (3.2)$$

где $E_{\tau \text{ в доп}} = 0.5 \dots 0.55$, кВ/мм – допустимая аксиальная напряженность при частоте 50 Гц для части ввода, находящейся в воздухе; $E_{\tau \text{ м доп}} = 0.8 \dots 1.25$ кВ/мм – допустимая аксиальная напряженность при частоте 50 Гц для части ввода, находящейся в масле.

По условию минимума расхода материалов необходимо принимать толщины слоев δ минимально возможными, определяемыми технологией. Обычно минимально допустимая толщина слоя изоляции при намотке кабельной бумагой толщиной $\Delta = 0.07 \dots 0.12$ мм $\delta_{\min} \cong (0.9 \dots 1.0)$ мм. Для бумаги толщиной $\Delta \sim 0.07$ мм возможно уменьшение толщины слоя изоляции до $\delta = 0.72$ мм. Эти минимально допустимые толщины определяются, с одной стороны, необходимым числом слоев бумаги (6...10), обеспечивающих максимальные значения электрической прочности в средней части, а с другой – связаны с точностью контроля наложения обкладок при намотке.

Длина уступов λ обычно принимается постоянной. При этом для выполнения условия постоянства аксиальной составляющей напря-

женности E_τ нужно обеспечить одинаковое напряжение на каждом слое ΔU , что возможно при равенстве емкостей между соседними обкладками. Отсюда получаем условие, связывающее радиальные и аксиальные размеры:

$$\frac{l_i}{\ln(d_i / d_{i-1})} = \text{const}, \quad (3.3)$$

где l_i – длина i -й обкладки; d_i и d_{i-1} – диаметры i -й и $i - 1$ -й обкладки.

Задавая минимальной толщиной слоя $\delta_{\min}$, определяют необходимое количество обкладок в остова:

$$N = \frac{U_{\text{расч}}}{E_{\text{доп}} \delta_{\min}}, \quad (3.4)$$

где $U_{\text{расч}}$ – расчетное напряжение; $E_{\text{доп}}$ – допустимая напряженность.

Если $(U_{\text{исп}} A_p) / U_{\text{раб}} \leq A_w$, то определяющим расчетным напряжением будет $U_{\text{раб}}$; при $(U_{\text{исп}} A_p) / U_{\text{раб}} > A_w$ определяющим расчетным напряжением будет $U_{\text{исп}}$. При выбранной средней аксиальной напряженности сумма длин уступов составит

$$N\lambda = \frac{U_{\text{исп}}}{n_3} \left(\frac{1}{E_{\text{тн}}} + \frac{1}{E_{\text{тв}}} \right), \quad (3.5)$$

где $E_{\text{тн}}$, $E_{\text{тв}}$ – аксиальные напряженности в нижней и верхней частях остова соответственно; n_3 – коэффициент запаса;

$$\lambda = \frac{B}{n_3} \left(\frac{1}{E_{\text{тн}}} + \frac{1}{E_{\text{тв}}} \right) e^{0.42 \ln \delta_{\min}}, \quad (3.6)$$

где B меньшее из чисел A ;

$$N = \frac{U_{\text{исп}}}{\lambda} \left(\frac{1}{E_{\text{тн}}} + \frac{1}{E_{\text{тв}}} \right). \quad (3.7)$$

Длина уступа по нижней и верхней частям соответственно:

$$\lambda_{\text{н}} = \frac{E_{\text{тв}}}{E_{\text{тн}} + E_{\text{тв}}} \lambda, \quad \lambda_{\text{в}} = \frac{E_{\text{тн}}}{E_{\text{тн}} + E_{\text{тв}}} \lambda. \quad (3.8)$$

Диаметры промежуточных обкладок и наружный диаметр остова определяются согласно выражению

$$d_i = d_0 \exp \left[\left(1 + \frac{l_0 - i\lambda}{l_0 - \lambda} \right) \frac{i}{2} \ln \left(1 + \frac{2\delta_1}{d_0} \right) \right], \quad (3.9)$$

где d_0 и l_0 – диаметр и длина первой обкладки; $l_1 = l_N + \lambda N$, l_N – длина последней обкладки; δ_1 – толщина первого слоя изоляции; i – номер слоя.

Величина d_0 определяется (задается конструктором) по определенным правилам исходя из ряда нормированных ГОСТом значений диаметров трубы и величин тока. Величина l_N определяется исходя из необходимости экранировки верхней части соединительной втулки и длины под установку трансформатора тока.

Из (3.9) следует, что толщины слоев δ_i распределены неравномерно, причем наиболее тонкий слой может быть только первым или последним. При определении минимального диаметра остова принимают

$$\delta_1 = \delta_{\min}, \text{ определяют } \delta_N = \frac{d_N - d_{N-1}}{2} \text{ и проверяют условие } \delta_N \geq \delta_{\min}.$$

Если оно не выполняется, то численным методом идет поиск такого значения, чтобы $\delta_N = \delta_{\min}$. Найдя такое δ_1 (по условию минимума δ_N), из (3.9) определяют диаметры промежуточных обкладок и их длины.

После округления по определенным правилам полученных значений ($N, \lambda_{\text{н}}, \lambda_{\text{в}}, l_N, d_N$), проверки напряженностей по слоям проводят проверку на нагрев и тепловую устойчивость. После этого расчет внутренней изоляции считается законченным.

Электрический расчет внешней изоляции

Для обеспечения требований к внешней изоляции по длине пути утечки (вылет ребра, число ребер и конструкция) выбираются верхняя и нижняя покрывки с необходимыми высотой и внутренним диамет-

ром. Внутренний диаметр покрывки должен обеспечить необходимую величину зазора между остовом и покрывкой с точки зрения допусков по сборке и канала для обеспечения циркуляции масла ($\Delta_{\min} \geq 4$ мм) для хорошего охлаждения при номинальном токе и токах перегрузки. Минимальная ширина масляного канала также определяется обеспечением необходимой электрической прочности при высоковольтных испытаниях и воздействии рабочих напряжений и температуры нагрева аппарата, на который устанавливается ввод.

При тепловом расчете может быть выявлена необходимость выполнения остова двухсекционным, чтобы создать канал в средней части остова для циркуляции масла, способствующей снижению температуры изоляции. В этом случае расчет остова проводится аналогично, с использованием тех же основных соотношений и определением числа обкладок в каждой секции остова.

На рис. 3.4 приведен пример модульной конструкции изоляционного остова.

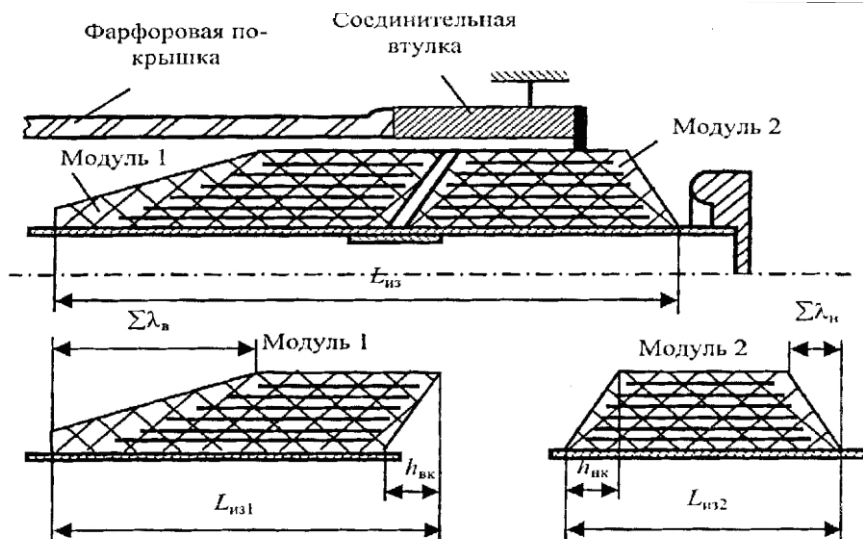


Рис. 3.4. Модульная конструкция изоляционного остова

3.3. РАСЧЕТ ВВОДА НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

В общем случае в условиях эксплуатации при установке ввода под некоторым углом к вертикали на него действуют:

- силы тяжести, создаваемые весом составных частей самого ввода;
- силы тяжести проводов;
- ветровые нагрузки;
- силы внутреннего давления, создаваемые избыточным давлением внутренней среды ввода;
- усилие стяжки, создаваемое пружинным узлом;
- электродинамические усилия, возникающие при протекании токов.

Как правило, механическая прочность ввода определяется выполнением двух условий:

- а) условием механической прочности верхней покрышки;
- б) условием нераскрытия ввода, т. е. герметичность в местах стыка покрышек с другими деталями ввода не должна быть нарушена.

Места стыка покрышек с другими частями ввода могут выполняться неармированными или армированными механическими креплениями с целью обеспечения герметичности.

Условие механической прочности верхней покрышки имеет вид

$$\sigma_{\text{экр}} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (3.10)$$

где $\sigma_{\text{экр}}$ – механическое напряжение, возникающее в опасном сечении верхней покрышки при совместном действии различных нагрузок; $\sigma_{\text{доп}}$ – допустимое механическое напряжение для данной площади сечения и материала покрышки.

Условие нераскрытия ввода выражается следующим соотношением:

$$[P_{\text{ст}} + P_{\text{мк}} + (P_{\text{вп}} + P_{\text{вы}})\cos\varphi - P_{\text{вд}} - R_{\text{пр}}]\alpha D \geq M_{\Sigma}, \quad (3.11)$$

где $\alpha=1/2$, если фланец соединительной втулки принимается абсолютно жестким; M_{Σ} – суммарный изгибающий момент, возникающий в опасном сечении верхней покрышки ввода при совместном действии перечисленных выше нагрузок; $P_{\text{ст}}$ – усилие стяжки ввода; $P_{\text{мк}}$ – усилие затяжки, создаваемое болтами механического крепления, если оно

предусмотрено в конструкции ввода; $P_{вп}$ – вес верхней крышки; $P_{в у}$ – вес верхнего узла ввода; $P_{в д}$ – осевое усилие на крышку, создаваемое избыточным давлением ($P_{изб}$) внутренней среды ввода; $R_{пр}$ – реакция резиновой прокладки; D – наружный диаметр верхней крышки в месте крепления к соединительной втулке.

Из условия (3.11) можно определить необходимое минимальное усилие стяжки ввода для обеспечения его герметичности или проверить его достаточность.

3.4. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

Для высоковольтных вводов как тел цилиндрической формы при решении тепловых задач удобно использовать общее уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$c\gamma \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + q, \quad (3.12)$$

где q – интенсивность внутренних источников, Вт/см³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/см · К; c – удельная теплоемкость, (Вт · с)/(г · К).

Для токоведущих частей $q = j^2 \rho$, для изоляционных частей $q = \epsilon f \operatorname{tg} \delta E^2$, где j – плотность тока, А/см²; ρ – удельное сопротивление, Ом·см.

В качестве основы для расчетов нагрева вводов с бумажно-масляной изоляцией на ЗАО «Мосизолятор» используется простая математическая модель, обладающая достаточной точностью для вычисления превышения температуры наиболее нагретой точки ввода и средней температуры масла над температурой окружающей среды в установившемся режиме:

$$\theta = a_1 J^2 + a_2 \theta_m + a_0, \quad (3.13)$$

где θ – превышение температуры элементов ввода над температурой окружающей среды; θ_m – превышение температуры верхних слоев

масла трансформатора над температурой окружающей среды; J – величина протекающего тока в долях от номинального тока ввода;

$$a_1 = K \frac{R_2}{S_2} R_{T1}, \quad a_2 = 1 - K,$$

$$a_0 = a_2 \frac{\omega C \operatorname{tg} \delta}{R} U^2; \quad K = \frac{S_2 / S_1}{S_2 / S_1 + R_{T2} / R_{T1}},$$

где S_1 и S_2 – площадки поверхностей ввода (нижней и верхней частей); R_{T1} и R_{T2} – тепловые сопротивления (нижней и верхней частей); R – омическое сопротивление токоведущих элементов.

При проектировании и разработке конструкций высоковольтных вводов проводят расчеты на тепловую устойчивость, нагрев в номинальном режиме, перегрузках сверх номинального тока в установившемся и переходном режимах и сравнивают полученные в процессе расчета значения температур с допустимыми.

Пределы внешних воздействий, соответствующие стандартным условиям испытаний вводов на нагрев:

- максимальная температура окружающего воздуха 40 °С;
- максимальная температура верхних слоев масла трансформатора, в которое погружается нижняя часть ввода в условиях постоянной нагрузки, 95° С;
- предельно допустимая температура наиболее нагретой точки ввода в условиях постоянной нагрузки 105 °С;
- предельно допустимое превышение температуры проводников, присоединенных к зажимам ввода на расстоянии 0.75 м от места присоединения к контакту при номинальном токе в воздухе 45 °С, в масле 65 °С.

3.5. РАСЧЕТ ВВОДОВ НА ДИНАМИЧЕСКУЮ И ТЕРМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ

Устойчивость высоковольтного ввода при токах короткого замыкания характеризуется его способностью противостоять механическим и тепловым воздействиям, возникающим при прохождении через ввод таких токов.

Электродинамическая устойчивость характеризуется (амплитудным) значением тока короткого замыкания, который ввод выдерживает без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе.

Термическая устойчивость характеризуется током короткого замыкания, который ввод выдерживает в течение определенного времени. При этом температура его частей не должна превосходить значений, допустимых при токах короткого замыкания, не должно происходить повреждений, препятствующих дальнейшей исправной работе ввода.

Расчет вводов на термическую стойкость состоит в определении наибольшей возможной величины температуры при кратковременном токе короткого замыкания (КЗ) токоведущих частей, соприкасающихся с изоляционными материалами и последующем сравнении расчетной величины максимальной температуры (θ_k) с предельно допустимой температурой нагрева при КЗ ($\theta_{\text{доп}}$).

Максимальная температура нагрева при КЗ определяется из уравнения теплопроводности для адиабатического нагрева с учетом начальных условий, соответствующих наиболее нагретой точке, и учетом зависимости удельного сопротивления и теплоемкости проводника от температуры, пренебрегая отводом тепла из-за кратковременности воздействия токов КЗ:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{kj^2}{\gamma} \frac{\rho_0(1+\alpha\theta)}{c_0(1+\beta\theta)}. \quad (3.14)$$

При начальном условии $\theta|_{t=0} = \theta_n$ решение этого уравнения имеет вид

$$\theta_k = \frac{1}{\alpha - \beta} \left\{ [1 + (\alpha - \beta)\theta_n] e^{\frac{\alpha - \beta}{c_0 \gamma} \rho_0 k_{\text{дп}} j^2 t_k} - 1 \right\}, \quad (3.15)$$

где α – температурный коэффициент удельного сопротивления, $1/^\circ\text{C}$; β – температурный коэффициент теплопроводности, зависящей от материала проводника, $1/^\circ\text{C}$; γ – плотность, кг/м^3 ; θ_n – начальная температура проводника, $^\circ\text{C}$; $k_{\text{дп}}$ – коэффициент добавочных потерь, учитывающий действие поверхностного эффекта; j – плотность тока КЗ, А/мм^2 ; C_0 – удельная теплоемкость материала проводника при

0 °С, Вт · с/г · град; ρ_0 – удельное сопротивление проводника при 20 °С, Ом · мм²/м; t – время действия КЗ, с.

По рекомендации МЭК максимальная температура нагрева токоведущей части в конце КЗ определяется по формуле

$$\theta_K = \theta_n + \beta k_{дп} j^2 t_K, \quad (3.16)$$

где $\beta = 6.9 \cdot 10^{-3}$ для меди, $\beta = 37.5 \cdot 10^{-3}$ для латуни, $\beta = 13.3 \cdot 10^{-3}$ для алюминия.

Коэффициент добавочных потерь рассчитывается по следующим формулам:

для токоведущей трубы

$$k_{дп} = 1 + 3.3 \cdot 10^{-10} \left(\frac{bq}{D\rho} \right) \left(\frac{f}{50} \right)^2; \quad (3.17)$$

при протяжке кабелей через трубу

$$k_{дп} = 1 + \frac{1}{0.8 + 3 \cdot 10^{13} \left(\frac{\rho k_y}{fq} \right)^3}. \quad (3.18)$$

При сплошном круглом проводнике $k_{дп}$ аппроксимируется полином

$$k_{дп} = 1.04 - 0.102\eta + 0.063\eta^2, \quad (3.19)$$

где $\eta = 1,407 \cdot 10^{-3} D \sqrt{f/\rho}$.

Если $\eta > 3$, то $k_{дп} = \frac{\sqrt{2}\eta + 1}{4}$, при $\eta \leq 3$ коэффициент $k_{дп}$ определяется при следующих значениях η .

η	$\leq 0,5$	1	1.5	2.0	2.5	3
$k_{дп}$	1,0	1.01	1.03	1.08	1.18	1.3

В приведенных формулах: f – частота, Гц; q – сечение проводника, мм²; ρ – удельное сопротивление при температуре при θ_n ,

Ом·мм²/м; α – температурный коэффициент удельного сопротивления, 1/°С; k_y – коэффициент скрутки, учитывающий диаметр проволок, из которых скручена жила ($k_y = 1.03$ для $q \leq 500$ мм²; $k_y = 1.05$ для $q > 500$ мм²); b – толщина стенки трубы, мм; D – наружный диаметр проводника, мм.

Расчет на динамическую стойкость состоит в определении величины и направления электродинамических сил взаимодействия токоведущих элементов друг с другом при расчете на механическую прочность.

Исходными данными для расчета электродинамических сил являются:

- а) геометрические параметры рассчитываемой токоведущей системы, т.е. линейные размеры отдельных элементов и их взаимное расположение в контуре данного полюса и относительно соседних полюсов;
- б) наибольшая величина расчетного тока короткого замыкания (амплитудное значение).

Расчет основан на анализе результирующих сил в момент наибольшего (ударного) тока короткого замыкания. Расчет электродинамических усилий производится на основе закона Био–Савара–Лапласа.

3.6 РАСЧЕТ ВВОДОВ НА ВИБРОПРОЧНОСТЬ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

При сейсмическом толчке ввод подвергается действию сложных колебательных нагрузок, действующих в каждом его сечении. Вид колебаний синусоидальный согласно ГОСТ 17516.1–90. При предъявлении к вводу требований по стойкости к сейсмическим воздействиям исходят из интенсивности землетрясения, уровня установки его над нулевой отметкой и требований, соответствующих требованиям по стойкости ввода к синусоидальной вибрации в течение одной минуты.

Согласно ГОСТу при расчете принимают, что на ввод одновременно действуют эквивалентные нагрузки в вертикальном и одном из двух взаимно перпендикулярных горизонтальных направлений.

Для стационарных изделий зависимость максимальной амплитуды ускорений от частоты вибрационного воздействия в горизонтальном направлении при уровнях установки над нулевой отметкой ≤ 10 м

и интенсивности землетрясения 9 баллов по шкале MSK-64 представлена на рис. 3.5.



Рис. 3.5. Зависимость максимальной амплитуды ускорения от частоты вибрационного воздействия горизонтального направления

Значения ускорений для других интенсивностей и уровней установки определяют путем умножения ускорений, полученных по рис. 3.5, на соответствующий коэффициент из ГОСТа. Значения ускорений в вертикальном направлении составляют 0.7 от соответствующих значений ускорений в горизонтальном направлении.

В диапазоне резонансных частот комплектных изделий к встроенному элементу (вводу) могут быть предъявлены требования по увеличению максимальных амплитуд ускорений, а в диапазоне частот, где резонансы комплектного изделия отсутствуют, предъявляют требования по удвоению максимальных амплитуд ускорений.

При расчете высоковольтных вводов принимают, что на изделие одновременно действуют эквивалентные нагрузки в вертикальном и одном из двух взаимно-перпендикулярных горизонтальных направлений (принимают наиболее жесткое для изделия направление), а также учитывают действие рабочих нагрузок. Точкой приложения этих нагрузок считают центр масс изделия.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ВВОДОВ ШУНТИРУЮЩИХ РЕАКТОРОВ

64

При выполнении обкладок ввода из фольги необходимо проводить расчеты по оценке тепловых потерь, возникающих из-за наведения токов в обкладках от магнитного поля. Такие вводы необходимо размещать, вынося их в сторону или вверх от магнитопровода.

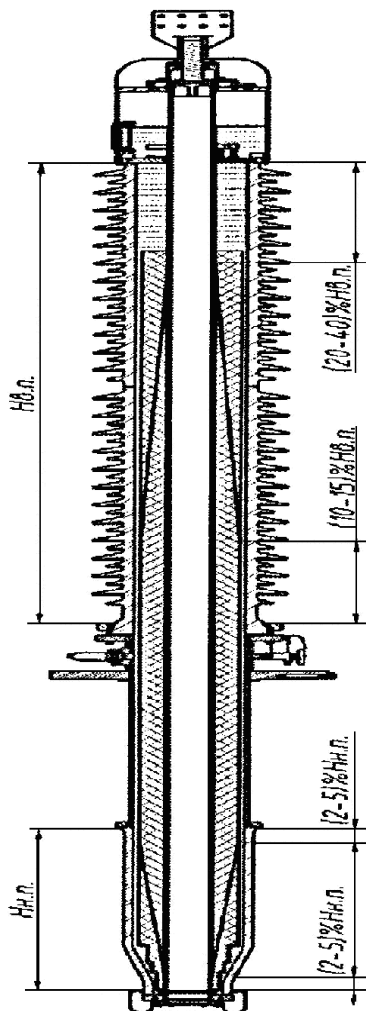
ЛИТЕРАТУРА

1. Никулин Н.В., Шишорина Г.Д. Высоковольтные вводы и их ремонт: учебник для техн. училищ. – М.: Высш. школа, 1980. – 141 с.
2. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения: учебник для вузов / под общ. ред. Г.С. Кучинского. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
3. Славинский А.З. Физика диэлектриков. Высоковольтная изоляции энергетической аппаратуры. – М.: Научтехлитиздат, 2007. – 256 с.
4. Александров Г.Н., Иванов Вс. Л. Стеклопластиковая изоляция линий электропередачи / отв. ред. В.М. Постолатий. – Кишинев: Штиинца, 1983. – 166 с.
5. Соболевский М.В., Музовский О.А., Попелева Г.А. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. – М.: Химия, 1975. – 296 с.
6. Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Полимерные материалы: справочник. – Л.: Химия, 1982. – 317с.

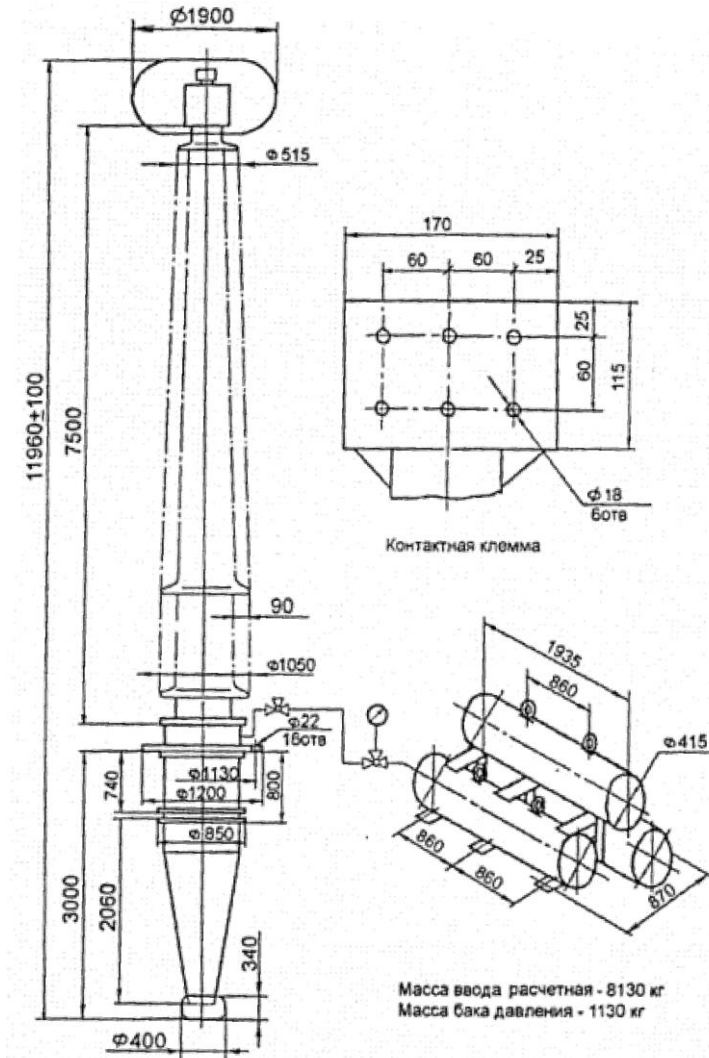
ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Ввод 220 кВ с газовой подушкой.
Размеры внутренних экранированных покрышек



Габаритные, установочные, присоединительные размеры и масса ввода ГМТ-20-1150/1250 (черт. 2ЩД.800.119)

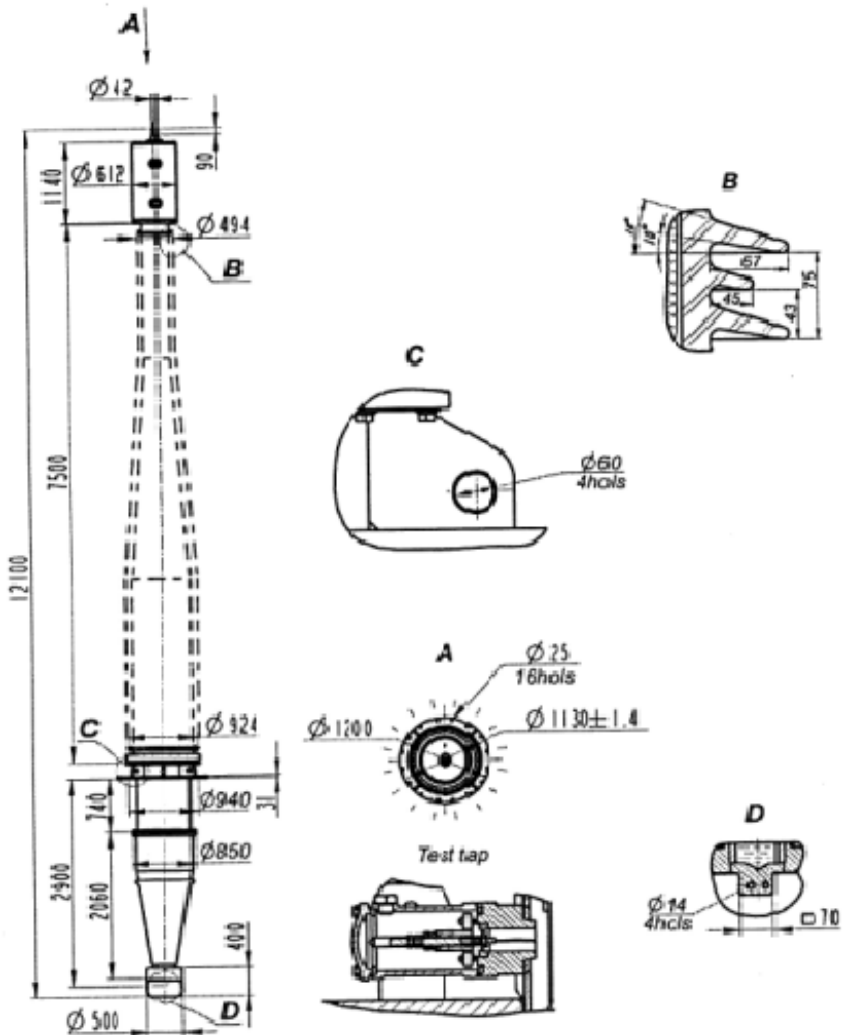


Основные технические параметры ввода ГМТ–20–1 150/1 250 У1

Параметр	Величина
Класс напряжения, действующее значение, кВ	1150
Номинальный ток, А	1250
Внутренняя изоляция	БМИ конденсаторного типа
Внешняя изоляция	Фарфор
Высота установки над уровнем моря, м	500
Наибольшее рабочее линейное напряжение $U_{\text{нр}}$, кВ	1 200
Наибольшее рабочее фазное напряжение $U_{\text{нр ф}}$, действующее значение, кВ	693
Отношение длины пути утечки к наибольшему линейному напряжению, см/кВ	Не менее 1,5
Испытательное напряжение промышленной частоты, действующее значение $U_{1 \text{ мин } 50 \text{ Гц}}$, кВ	1 150
Испытательное напряжение промышленной частоты, действующее значение $U_{1 \text{ ч } 50 \text{ Гц}}$ с измерением уровня частичных разрядов, кВ	900
Испытательное напряжение полного грозового импульса положительной и отрицательной полярности в сухом состоянии, максимальное значение, кВ	2 700
Плавный подъем напряжения промышленной частоты в сухом состоянии и под дождем, кВ, или испытание напряжением коммутационного импульса $U_{\text{ки}}$, кВ	1 300 2 100 (1 850*)
Испытательное напряжение на стойкость изоляции в отношении теплового пробоя, $U = 1,1(1200 / \sqrt{3})$, кВ	765
Испытательная нагрузка на изгиб, Н	2 500
Расчетный ток термической стойкости, $t = 5 \text{ с}$, кА	7
Расчетный ток динамической стойкости, кА	17
Климатическое исполнение – У1 (температура окружающей среды), °С	–40... + 40

* Данное испытательное напряжение соответствует уровню коммутационных перенапряжений $1,6 U_{\text{ф}}$.

Габаритные, установочные, присоединительные размеры ввода 1200 кВ/800А

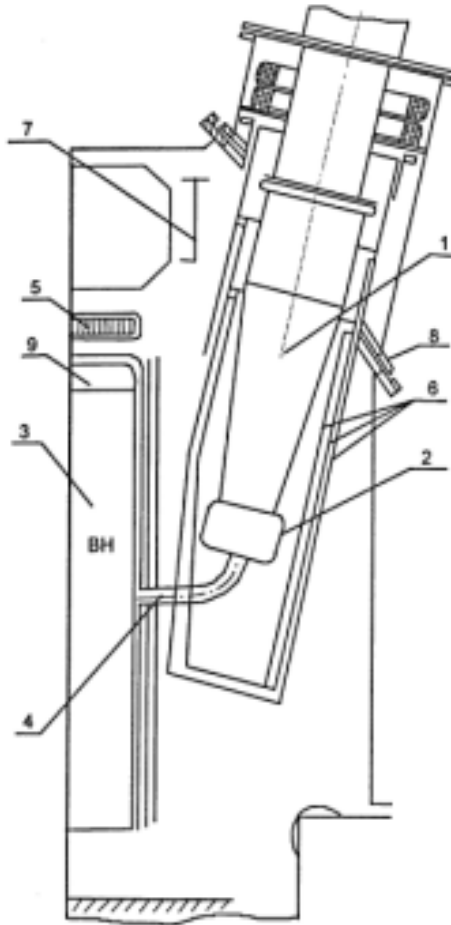


Основные технические параметры ввода 1200 кВ/800 А

Наименование параметра	Величина
Выдерживаемое напряжение (действующее значение), кВ	1 200 (10 мин) 1 100 (120 мин)
Максимальное рабочее напряжение между фазой и землей, кВ	982
Амплитудное значение, кВ	$1700(1200\sqrt{2}, 982\sqrt{3})$
Номинальный ток, А	800
$\operatorname{tg} \delta_1$ при $U = 982$ кВ, %	≤ 0.5
Уровень частичных разрядов при $U = 982$ кВ, пКл	$\leq 10^*$
Выдерживаемое напряжение при грозовом импульсе (пиковое значение, 1,2/50 мкс), кВ	2550
Выдерживаемое напряжение при коммутационном импульсе (пиковое значение, 250/2500 мкс)	1850 (в сухом состоянии)
Длина пути утечки, мм	24000
Сейсмостойкость, м/с^2	0,25g по горизонтали (a_r) 0.18g по вертикали (a_b) ($a_b = 0,7 a_r$)
Выдерживаемая консольная нагрузка, Н	3500
Высота установки над уровнем моря, м	До 1000
Угол установки	0° (вертикально)
Место установки	Закрытое помещение
Температура окружающего воздуха, $^\circ\text{C}$	min -5 max $+35$
Максимально допустимая температура масла, в котором расположена нижняя часть ввода при длительном режиме, $^\circ\text{C}$	$+60$ (50 Гц) $+50$ (200 Гц)

Примечание. Значения $\operatorname{tg} \delta_1$ и уровень частичных разрядов при других напряжениях ($\text{ЧР} \leq 300$ пКл) из-за помех при измерениях и могут уточняться при испытаниях.

**Типовая конструкция установок вводов
500...1150 кВ переменного тока**



1 – ввод; 2 – экран ввода; 3 – обмотка; 4 – токо-
провод; 5 – прессующее кольцо; 6 – изоляционные
цилиндры; 7 – консоль; 8 – фланец; 9 – емкостное
кольцо

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Современные конструкции и типы высоковольтных вводов	4
1.1. Типы изоляции высоковольтных вводов	4
1.2. Регулирование электрических полей во вводах	9
1.3. Покрытие электродов твердым изоляционным материалом ..	11
1.4. Внешняя и внутренняя изоляция высоковольтных вводов	12
1.4.1. Структура целлюлозной бумаги	16
1.4.2. Масло	18
1.4.3. Эпоксидный компаунд	23
1.4.4. Элегаз	27
1.4.5. Фарфор	30
1.4.6. Стеклопластик	32
1.4.7. Кремнийорганические полимеры	35
Глава 2. Технология изготовления внутренней изоляции	42
2.1. Намотка и сушка бумажного остова	42
2.2. Бумажно-масляная изоляция	42
2.3. Основные операции при изготовлении остова RIP-изоляции .	43
Глава 3. Общие принципы конструирования и методы расчета высоковольтных вводов	47
3.1. Система автоматизированного проектирования высоковольтных вводов	47
3.2. Электрический расчет	51
3.3. Расчет ввода на механическую прочность	57
3.4. Тепловой расчет	58
3.5. Расчет вводов на динамическую и термическую стойкость	59
3.6. Расчет вводов на вибропрочность при сейсмическом воздействии	62
Глава 4. Особенности конструкции вводов шунтирующих реакторов	64
Литература	65
Приложения	66
1. Ввод 220 кВ с газовой подушкой	66
2. Габаритные, установочные, присоединительные размеры и масса ввода ГМТ–20–1150/1250	67
3. Основные технические параметры ввода ГМТ–20–1150/1250У1 Таблица П.1	68
4. Габаритные, установочные, присоединительные размеры ввода 1200 кВ/800 А	69
5. Основные технические параметры ввода 1200 кВ/800 А	70
6. Типовая конструкция установки вводов 500...1150 кВ переменного тока	71