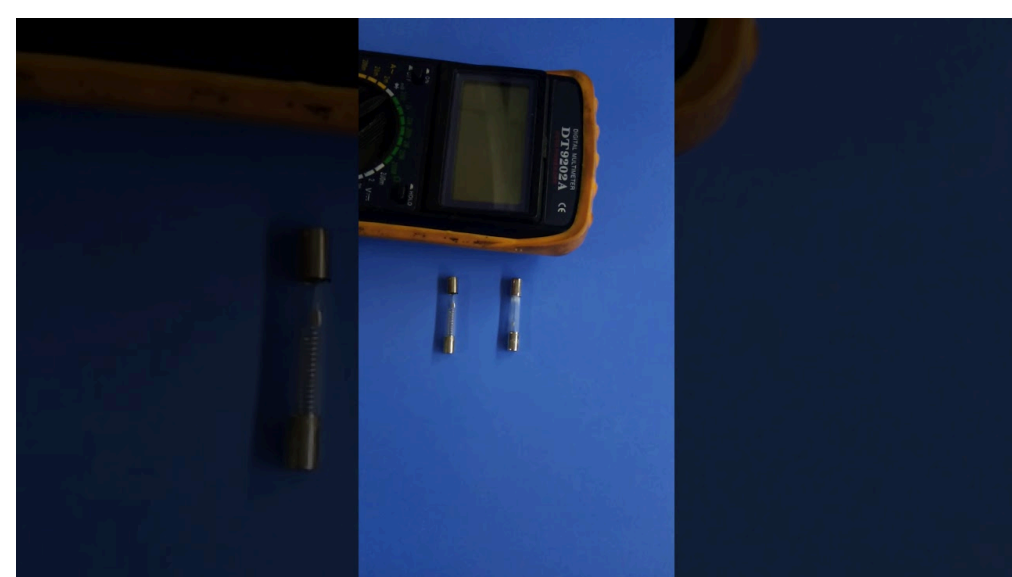


Здравствуйте дорогие друзья. Сегодня затронем тему, от которой напрямую зависят и ресурс трансформатора, и безопасность персонала, и устойчивость всей подстанции. Высоковольтные предохранители часто воспринимают как второстепенную мелочь, но любой релейщик или эксплуатационщик подтвердит: одна неверно подобранная вставка может обернуться сгоревшей обмоткой, затяжным простым и тяжелым разбором аварии.

В этой статье я расскажу, как на практике подходить к выбору предохранителей для силовых трансформаторов, какие параметры реально важны, где чаще всего ошибаются и как этих ошибок избежать. Разговор будет не академический, а с опорой на реальные кейсы эксплуатации напряжением от 6 до 110 кВ.



Зачем трансформатору нужны высоковольтные предохранители

Звучит очевидно, но все же стоит обозначить: задача предохранителя не в том, чтобы «защитить все от всего». Его реальная функция гораздо уже. По сути, это быстродействующий, одноразовый элемент, который должен отключить ток короткого замыкания или тяжелой перегрузки раньше, чем трансформатор успеет получить необратимые повреждения.

Дело в том, что любой силовой трансформатор обладает определенной термической и электродинамической стойкостью. В паспорте производитель честно пишет, какой ток и какое время он выдержит без повреждений. Высоковольтные предохранители должны отработать так, чтобы реальный ток повреждения не вышел за этот «паспортный коридор».

Например, на подстанции 10 кВ малый трансформатор 1000 кВА был защищен предохранителями с заведомо завышенным током. В момент внутреннего замыкания в обмотке предохранитель, конечно, все равно отстрелил, но через доли секунды после того, как трансформатор уже получил пробой изоляции и межвитковое КЗ. Внешне все выглядело «как положено» отключилось, дуга погасла, но трансформатор ушел в капитальный ремонт. Правильно подобранные предохранители в этом узле должны были отключить цепь раньше, с меньшими тепловыми воздействиями.

Значит, предохранитель для трансформатора нужен для трех задач. Первое, ограничить энергию короткого замыкания. Второе, локализовать повреждение там, где оно возникло, не передавая его по секциям и другим элементам сети. Третье, сохранить трансформатор как дорогостоящий актив, а не жертвовать им каждый раз при серьезной аварии.

Где и как ставят высоковольтные предохранители

Высоковольтные предохранители в схемах с силовыми трансформаторами ставят по разному в зависимости от уровня напряжения и принятой схемы защиты.

На стороне 6-10 кВ в распределительных сетях чаще всего применяют предохранители в комплектных распределительных устройствах, особенно при защите трансформаторов малой и средней мощности до 2,5-4 МВА. Там предохранитель работает в паре с выключателем нагрузки или разъединителем, формируя относительно простой и надежный узел.

На стороне 35 110 кВ силовые трансформаторы обычно защищают полнокомплектным релейно защитным комплексом с силовыми выключателями. Высоковольтные предохранители в таких схемах, как правило, используют для защиты цепей собственных нужд, трансформаторов напряжения, устройств РПН или резервных вспомогательных трансформаторов небольшой мощности.

Отдельный случай, защита распределительных трансформаторов 6 10 0,4 кВ в сельских сетях, где по экономическим причинам не ставят дорогие выключатели. Тут предохранитель на стороне ВН часто является единственным коммутационно защитным органом, и от его характеристик зависит очень многое.

На практике выбор схемы и конкретного типа предохранителя всегда завязан на три вещи, конфигурацию сети, уровень токов КЗ и требования по селективности. Так вот, оптимальный вариант для одного узла при тех же напряжениях может оказаться абсолютно провальным решением в другом, если поменялись режимы или структура сети.

Основные типы высоковольтных предохранителей для трансформаторов

Стоит заранее разобраться, какие типы предохранителей реально применяются рядом с силовыми трансформаторами. Это поможет не путать между собой устройства с разной физикой работы и, соответственно, разной областью применения.

На первом этапе нужно разобраться с тремя базовыми группами: ограничивающие ток предохранители, предохранители общего назначения с плавкой вставкой и специальные конструкции для защиты РПН и трансформаторов напряжения.

Разберём самые актуальные типы и их особенности.

- Трубчатые плавкие предохранители общего назначения. Простая конструкция, плавкая вставка в фарфоровом или композитном корпусе, заполнение кварцевым песком. Работают по принципу «перегорания» вставки с последующим дугогашением в наполнителе. Часто применяются для трансформаторов небольшой мощности в распределительных сетях 6 10 кВ.
- Токоограничивающие высоковольтные предохранители. Обладают специально сформированной времятоковой характеристикой, при КЗ очень быстро переходят в дуговой режим и за счет этого ограничивают амплитуду тока. Это высокоэффективный инструмент, когда нужно защитить трансформатор при высоких токах КЗ, но сеть не позволяет сильно увеличивать отключающую способность выключателя.
- Предохранители для РПН и специальных обмоток. Обычно имеют более точные уставки, учитывают особенности токов в цепях регулирования под нагрузкой. Используются не так массово, но при проектировании крупных трансформаторных блоков их нельзя игнорировать.
- Комбинированные устройства предохранитель плюс выключатель нагрузки. Часто применяются в КРУ и КТП, где предохранитель выполняет роль защитного органа, а выключатель нагрузки обеспечивает коммутацию под нагрузкой. Вот, то есть предохранитель там застраховывает выключатель по токам, с которыми тот сам справиться не может.

Суть здесь в чем, тип предохранителя почти всегда диктуется уровнем напряжения, токами КЗ и тем, какую роль он играет в общей схеме защиты. В распределительных сетях с большим количеством трансформаторов распределенная защита на предохранителях при правильном расчете иногда оказывается дешевле и надежнее, чем установка повсеместно высокоскоростных выключателей с продвинутой релейкой.

На какие параметры смотреть в паспорте и каталоге

Когда берешь в руки каталог и пытаешься выбрать конкретный тип, глаза быстро разбегаются. Номиналы, классы, климатические исполнения, типоразмеры, «гашение дуги в кварцевом песке», «серебряная плавкая вставка» и так далее. Вот потому что важно понимать, какие параметры критичны, а какие скорее маркетинг или тонкая оптимизация.

По моему мнению, для предохранителя, который должен честно защитить трансформатор, ключевыми являются несколько вещей: номинальное напряжение, номинальный ток, отключающая способность, времятоковая характеристика и возможность работы на конкретной климатической площадке.

Например, если взять предохранитель на номинальное напряжение 10 кВ и поставить его в ячейку 6 кВ, это не ошибка. Напряжение предохранителя не должно быть ниже напряжения сети. А вот если на сеть 10 кВ поставить

предохранитель, рассчитанный максимум на 7,2 кВ, это уже прямое нарушение и потенциальная авария при дуговом пробое.

С током сложнее. В большинстве случаев номинальный ток предохранителя берут исходя из номинального тока трансформатора с учетом возможных перегрузок и режима работы. Допустим, трансформатор 1000 кВА на 10 кВ имеет номинальный ток порядка 57,7 А. Можно поставить предохранитель на 63 А, если сеть и режим не предполагают частых длительных перегрузок. Но если по заданию трансформатор должен зимой регулярно тянуть 120 процентов нагрузки, ток предохранителя придется поднять, иначе он будет срабатывать не на аварии, а на штатных зимних режимах.

Отключающая способность должна быть не ниже максимально возможного тока КЗ в узле установки. Короче, если расчетный ток короткого замыкания на шинах 10 кВ составляет 12 кА, а предохранитель способен надежно отключать только 8 кА, это типичный пример плохого проектного решения. В аварийный момент плавкая вставка может просто взорваться, не погасив дугу, и вы получите разрушение аппарата и, возможно, повреждение соседних ячеек.

Здесь такой момент, времятоковая характеристика предохранителя должна быть согласована с характеристикой трансформатора и остальной защиты. То есть там, где проектировщик тщательно рисует селективность защит, без реальной кривой предохранителя делать нечего. Особенно если на стороне НН стоят автоматические выключатели с настройками близкими по времени.

На данный момент большинство серьезных производителей предоставляет не только таблицы уставок, но и цифровые кривые, которые можно загружать в программы координации защит. Это отличные параметры для того, чтобы оценить, насколько ваш предохранитель «успеет» отключить аварию раньше трансформатора и раньше вышестоящих устройств.

Номинальный ток и мощность трансформатора: где типичные ошибки

Суть в том, что многие до сих пор выбирают высоковольтные предохранители по принципу «что есть в наличии на складе» или «что стояло у соседа». На практике это один из самых эффективных способов получить либо хроническое «выбивание» предохранителей, либо недозащиту.

Не рекомендую механически завышать ток предохранителя «на всякий случай». Да, это снижает риск ложных срабатываний при перегрузках и больших пусковых токах, например, при включении мощных двигателей на стороне НН. Но одновременно вы отдаляете момент отключения при реальном повреждении, а трансформатор в эти лишние секунды продолжает получать тепловой удар.



Могу рекомендовать другой подход. Сначала четко посчитать номинальный ток по мощности трансформатора и рассчитать реальные эксплуатационные режимы, в том числе планируемые перегрузки, сезонные пики, пусковые токи крупных [по этой ссылке](#) электроприемников. Затем подобрать номинал вставки, исходя из времятоковой характеристики, а не из «запаса по току».

Например, для трансформатора 1600 кВА на 10 кВ номинальный ток будет примерно 92 А. Если сеть допускает кратковременные перегрузки до 150 процентов в течение нескольких часов, имеет смысл смотреть в сторону предохранителей на 100 125 А, но обязательно с проверкой по кривым. Слишком высокий номинал, скажем 160

А, делает защиту формальной, трансформатор при межвитковом КЗ внутри обмотки может не успеть «выбить» предохранитель в безопасное время.

Лично я в проектах для новых подстанций всегда закладываю небольшой резерв по току, но обязательно проверяю, как выглядит точка срабатывания предохранителя относительно предельно допустимой кривой нагрева трансформатора. Вот и соответственно, вместо абстрактного «чуть побольше» получается вполне инженерное решение с прогнозируемым поведением в авариях.

Учет токов короткого замыкания и селективность

Как это работает в реальной сети. У вас есть рассчитываемые токи КЗ на стороне высокого напряжения трансформатора, есть предохранитель, есть выключатель и есть защита на стороне низкого напряжения. Все это должно срабатывать в определенном порядке, иначе вы потеряете селективность.

Опять же, на стороне НН стоят автоматические выключатели потребителей с собственными характеристиками. В идеале при КЗ на стороне 0,4 кВ сначала должен сработать ближайший к месту повреждения аппарат. Если же предохранитель ВН вылетает при каждом серьезном коротком замыкании в цеховой сети, значит, селективность нарушена.

На практике для трансформаторов до 1000 1600 кВА в сетях 6 10 кВ часто удается выстроить приемлемую селективность за счет грамотного подбора предохранителей и автоматов на стороне НН. Основные этапы при этом всегда одни и те же: расчет токов, выбор времятоковых характеристик, проверка по селективности и затем уже увязка с реальными аппаратами, доступными у поставщиков.

Значит, если ток срабатывания автомата на стороне НН и время его отключения попадает в зону до срабатывания предохранителя ВН, селективность считается выдержанной. Если наоборот, предохранитель уходит «влево» по времени для токов, на которые рассчитан автомат, придется менять номиналы или тип аппаратуры.

Условия эксплуатации: климат, загрязнение, монтаж

Что это значит для выбора конкретной модели. Предохранитель сам по себе достаточно простой аппарат, но его изоляция и механическая конструкция должны выдерживать реальные условия на объекте.

В смысле, одно дело чистый закрытый распределительный пункт в городе и совсем другое открытая КТП посреди промышленной площадки, где летит цементная пыль или уголь. Высоковольтные предохранители в открытом исполнении при сильном загрязнении изоляции могут подтекать токами, греться и стареть значительно быстрее паспортного срока.

В большинстве случаев производитель указывает не только климатическое исполнение по ГОСТ, но и допустимый уровень загрязнения, высоту над уровнем моря, рабочий диапазон температур. На Крайнем Севере или в высокогорных районах часто приходится брать предохранители в более «жестком» исполнении и закладывать дополнительные меры по обслуживанию и контролю состояния.

На практике выручает простое правило. Если есть сомнения по условиям работы, лучше один раз связаться с технической поддержкой производителя и проговорить реальные параметры площадки: диапазон температур, наличие агрессивных сред, уровень запыленности. Часто удаётся достигать классных результатов не столько заменой типа предохранителя, сколько грамотным выбором его конструктивного исполнения.

Практический чек лист перед выбором

Чтобы систематизировать сказанное, полезно иметь короткий перечень вопросов, на которые нужно ответить перед тем, как заказывать или утверждать конкретный тип предохранителей для трансформатора.

- Какова номинальная мощность и напряжение трансформатора, какие реальные режимы нагрузки и допустимые перегрузки по заданию.
- Каковы расчетные токи короткого замыкания в точке установки и соответствует ли им отключающая способность предохранителя.
- Согласованы ли времятоковые характеристики предохранителя с защитой на стороне НН и вышестоящими аппаратами по селективности.
- В каких климатических и эксплуатационных условиях будет работать предохранитель и соответствует ли им выбранное исполнение.

- Предусмотрены ли удобный и безопасный доступ, а также регламентированный контроль состояния и своевременная замена вставок.

Вот, дальше уже имеет смысл смотреть на детали конкретных моделей, производителя, наличие на складе и стоимость владения, включая запасные вставки.

Производитель и качество исполнения

Разумеется, рынок наполнен разными решениями. Есть продукция крупных международных брендов, есть добротные отечественные серии, есть откровенный «ноунейм». Как правило, предохранитель работает годами и вспоминают о нем только при аварии. В этот момент проверяется не только расчет, но и качество изготовления.

Скорее всего, в прайсах вы увидите приличный разброс цен за, казалось бы, одинаковые по номиналам предохранители. Здесь важно смотреть глубже, на реальные испытания, наличие сертификатов, статистику отказов. Мы используем именно такие критерии в инженерных службах, когда приходится выбирать решения для ответственных подстанций.

Не стоит забывать и о совместимости с имеющимися аппаратами. Предохранитель одного производителя может формально подходить по параметрам, но иметь другие посадочные размеры, иную конструкцию контактных ножей, свои крепежные особенности. На первом этапе лучше проверить чертежи или взять опытный образец, чем потом подгонять КРУ болгаркой на монтаже.

Если говорить о современной номенклатуре, сейчас это самый передовой период в части материалов корпусов и контактных соединений. Самый передовой материал для корпусных деталей далеко не всегда фарфор, часто это высококачественные композиты с лучшей стойкостью к ударам и меньшим весом. Однако для тяжелых климатических условий или специфических производств проверенный фарфоровый корпус иногда предпочтительнее.

Эксплуатация, обслуживание и типичные отказы

Как бы ни был хорош предохранитель по паспорту, реальная его жизнь сильно зависит от того, как его эксплуатируют. В общем, у эксплуатационщиков хватает забот и без того, но несколько простых действий сильно повышают надежность.

На практике основная проблема даже не в том, что плавкая вставка «не держит» ток. Куда чаще встречаются подгорание контактных соединений, растрескивание корпусов от механических воздействий, нарушение герметичности и, как следствие, ухудшение дугогасительных свойств заполнителя. То есть внешне предохранитель целый, но внутри плотность песка уже не та, и при аварии его поведение становится непредсказуемым.



Не рекомендую оставлять в работе предохранители, у которых визуально заметны трещины, следы локального перегрева, потемнение изоляции или перекосы в креплениях. Даже если измерения сопротивления изоляции пока в норме, такие устройства лучше вывести из работы планово, а не ждать, пока их добьет реальная авария.

Общие рекомендации для эксплуатационников простые: регулярный визуальный осмотр, проверка состояния контактных соединений, контроль качества затяжки, защита от механических ударов при ревизиях ячеек. По сути, все то же, что и для любой другой высоковольтной аппаратуры. Зачем это, думаю, лишний раз объяснять не нужно, любой, кто видел последствия взрыва предохранителя в КРУ, запоминает это надолго.

Частые вопросы и заблуждения

Что делать, если в сети большие пусковые токи и «выбивает» предохранитель на ВН. Здесь два варианта. Либо неправильно подобран номинал и характеристика самого предохранителя, либо некорректно подобрана иерархия защит, и часть работы, которая должна ложиться на аппараты НН, переложена на сторону ВН. На практике решение редко сводится к простому механическому увеличению номинала вставки, чаще приходится пересматривать схему в целом.

Что это значит, когда говорят, что предохранитель «ограничивает ток короткого замыкания». По сути, токоограничивающий предохранитель переходит в дуговой режим настолько быстро, что реальный максимум тока КЗ просто не успевает разогнаться до значения, которое диктует индуктивность и сопротивление сети. То есть, энергия, выделившаяся в поврежденном месте, становится существенно меньше.

Какие результаты можно достичь, если к выбору предохранителей подойти системно. Во многих проектах удастся увеличить средний ресурс трансформаторов на годы, просто убрав лишние тепловые удары при незначительных внутренних повреждениях и обеспечив более мягкую локализацию аварий. В смысле денег это означает меньше аварийных замен, меньше внеплановых простоев и более прогнозируемый график ремонтов.

Вместо заключения: на что действительно опираться

Резюмируем ключевые моменты. Высоковольтные предохранители для трансформаторов, при всей своей простоте, критически важный элемент защиты. Их нельзя выбирать только по мощности трансформатора или по наличию на складе. Суть в том, что хороший выбор упирается в честные расчеты, учет реальных режимов, согласование с остальной защитой и трезвую оценку условий эксплуатации.

Что в итоге. Если вы проектировщик, закладывайте предохранители не в последнюю очередь, а вместе с основными защитами трансформатора. Если вы эксплуатационщик, не относитесь к ним как к расходнику «пока не сгорит, не трогаем». Если вы закупщик, помните, что разница в цене между безымянной вставкой и проверенным изделием производителя меркнет на фоне стоимости трансформатора и простоя цеха.

Так сказать, высоковольтный предохранитель стоит дешево до тех пор, пока он работает так, как должен. Как только он неправильно срабатывает или не срабатывает вовсе, цена вопроса становится совсем иной. И вот здесь уже решают не красивые слова в каталоге, а точный расчет и продуманный выбор под конкретный трансформатор и конкретную сеть.