

К теме ОПН, к различным аспектам их разработки, испытания, выбора и применения журнал обращался неоднократно ([www.news.elteh.ru](http://www.news.elteh.ru)). Однако круг не до конца проясненных вопросов в этой области еще не исчерпан, так как практически каждая публикация об этом оборудовании вызывает волну откликов – заинтересованных и неоднозначных.

Авторы новой статьи, посвященной ОПН, привлекают внимание специалистов к проблемам взрывобезопасности этих защитных аппаратов и способам ее обеспечения. В частности, они высказывают свою точку зрения на выбор тока для соответствующих испытаний.

## ВОПРОСЫ ВЫБОРА ТОКА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ОПН 6–750 кВ

Ограничитель перенапряжений (ОПН), предназначенный для защиты изоляции от грозовых и коммутационных перенапряжений, является неотъемлемым и широко распространенным элементом энергосистем, который, как и другие высоковольтные аппараты, иногда повреждается. Если повреждение ОПН сопровождается взрывным разрушением его оболочки, то это может представлять опасность для персонала подстанции и расположенного рядом с ОПН оборудования.

Согласно ГОСТ [1] и МЭК [2] взрывобезопасность ОПН можно определить как отсутствие взрывного разрушения при внутреннем повреждении ОПН или разрушение ОПН с разлетом осколков в нормируемой зоне.

Цель данной статьи – обозначить некоторые проблемы, связанные с обеспечением взрывобезопасности ОПН в условиях конкретного распределительного устройства.

### ВЗРЫВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОПН: ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ

Причиной взрывного разрушения ОПН, как правило, является повышение давления в его корпусе сверх расчетного вследствие возникновения во внутреннем объеме электрической дуги. Основными факторами, приводящими к возникновению дуги внутри ОПН, являются:

- потеря тепловой устойчивости столба (или его части) нелинейных элементов (варисторов) вследствие изменений характеристик варисторов [3] под действием эксплуатационных факторов (импульсные воздействия, напряжение 50 Гц);
  - перекрытие столба варисторов (или части столба с последующим тепловым пробоем оставшихся варисторов) по поверхности при протекании в них импульсных токов большой величины и малой длительности (как правило, при грозовых перенапряжениях);
  - увлажнение внутренних элементов ОПН, вследствие чего заметно возрастает ток проводимости через внутренние конструктивные элементы ОПН (столб увлажненных варисторов, поверхность или толща увлажненного стеклопластикового цилиндра и т.п.).
- При внутреннем повреждении ОПН наибольшую опасность представляют следующие фрагменты конструкции:
- осколки фарфоровой изоляции, которые, во-первых, могут обладать большой кинетической энергией и значительной массой, во-вторых, имеют острые края;
  - варисторы (как целые, так и их фрагменты), опасность которых аналогична осколкам фарфора;
  - нижний и верхний фланцы ОПН; хотя фланцы имеют болтовые соединения с заземляющей шиной и токоведущими частями электроустановки, они могут представлять серьезную опасность – особенно верхний фланец, который при гибком соединительном шлейфе большой длины может повредить расположенное рядом с ОПН оборудование;
  - горючие элементы полимерной изоляции.

При разрушении ОПН необходимо учитывать следующие:

- для персонала;

- для рядом расположенного оборудования;

- для надежного электроснабжения потребителей.

Для персонала и оборудования по понятным соображениям ОПН с полимерной изоляцией имеет с точки зрения взрывобезопасности серьезное преимущество перед ОПН с фарфоровой изоляцией. Однако преимущества того или иного вида изоляции ОПН не очевидны, когда приходится говорить о надежном электроснабжении потребителей.

### ПОВРЕЖДЕНИЕ ОПН И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Повреждение ОПН приводит к необходимости отключения присоединения, на котором он установлен, вне зависимости от типа изоляции ОПН. Поэтому в вопросах обеспечения надежного электроснабжения потребителей немаловажен другой фактор – место установки ОПН. Ниже дан лишь ряд общих соображений авторов статьи по размещению ОПН с точки зрения потенциальных последствий его повреждения.

Если эффективность защиты от перенапряжений практически равноправна для схем, где расстояние между ОПН и оборудованием составляет, скажем, 2 или 5 метров, то в вопросах взрывобезопасности, с точки зрения последствий повреждения ОПН расстояние играет большую роль.

Если ОПН установлен на линии или у трансформатора, то он находится в зоне действия релейной защиты соответствующего присоединения. Например, повреждение ОПН у трансформатора приведет к отключению одноименного трансформатора, однако остальные присоединения (линии, трансформаторы) останутся в работе. Если же, как этого в некоторых схемах требуют ПУЭ [4], ОПН, не имеющий собственного выключателя, установлен на сборных шинах распределительного устройства, повреждение такого ОПН означает повреждение изоляции сборных шин и потребует отключения всех присоединений. Отчасти поэтому некоторые специалисты считают неудачным с точки зрения надежности электроснабжения типовое решение по размещению ОПН на сборные шины.

Если ОПН установлен внутри ячейки вакуумного выключателя 6–10 кВ, то в случае его повреждения нелишне вспомнить о выбросе раскаленных газов. Именно они становятся причиной образования внутри ячейки дуги между фазами, приводящей к междуфазному короткому замыканию, которое, во-первых, повреждает выключатель, а во-вторых – может перейти в междуфазное короткое замыкание на сборных шинах со всеми вытекающими для потребителей последствиями. Такие случаи известны и говорят о необходимости обоснования установки ОПН в ячейке вакуумного выключателя, коммутирующего то или иное присоединение.

### СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ОПН

Взрывобезопасность ОПН обеспечивается рядом конструктивных решений, реализуемых при изготовлении ОПН. Эти решения отличны для аппаратов, имеющих внутренний преднамеренно созданный производителем газовый (воздушный) объем, и для аппаратов без такого объема.

**Павел Голубев,**

начальник Департамента по организации эксплуатации и ТОиР ОАО «Холдинг МРСК», г. Москва

**Виктор Дмитриев,** заместитель директора по научной работе

**Михаил Дмитриев,** начальник отдела научно-технических исследований ЗАО «Завод энергозащитных устройств», г. Санкт-Петербург

С точки зрения взрывобезопасности международный стандарт МЭК [2] разделяет конструкции ОПН на два типа (рис. 1):

- тип А, где вероятность возникновения повреждения в газовом объеме намного выше, чем в твердом материале;
- тип В, где высока вероятность повреждения в твердом материале.

По МЭК к типу А относят ОПН, в конструкции которых вдоль всей длины имеется газовый канал, а его объем составляет  $\geq 50\%$  внутреннего объема, незаполненного активными частями. ОПН типа В выполнены из твердых материалов без внутреннего газового объема или имеют внутренний газовый объем  $< 50\%$  внутреннего объема, не заполненного активными частями. Под «активными частями» в МЭК понимают варисторы и любые металлические прокладки, включенные последовательно с ними.

По МЭК ограничители ОПН типа А – это аппараты в фарфоровом корпусе, или в корпусе из сложных композитных полимерных материалов, оборудованные устройствами сброса давления, которые разрываются или открываются при точно установленном давлении, таким образом уменьшая давление в аппарате.

ОПН типа В, как правило, не имеют устройства сброса внутреннего давления как отдельного конструктивного элемента и выполнены из твердых материалов без внутреннего газового объема. При образовании внутри такого ОПН дуги, она вызывает сильное испарение и возможно прогорание (прожигание) корпуса и/или внутреннего материала. Свойства взрывобезопасности этих ОПН при внутреннем повреждении определяются их способностью растрескиваться или вскрываться под действием электрической дуги, предотвращая при этом сильное взрывное разрушение.

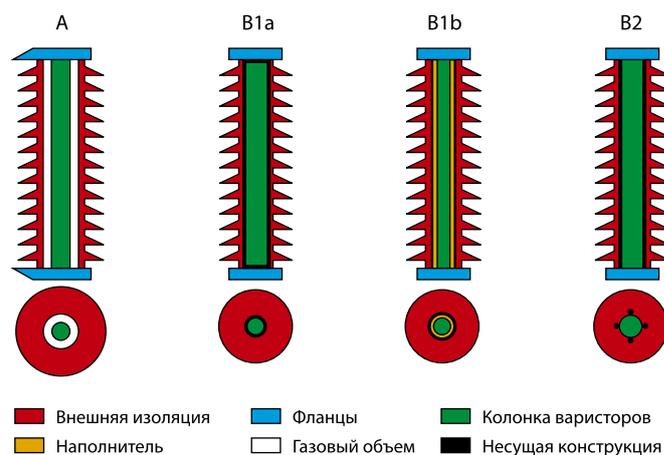
В аппаратах типа А со значительным внутренним газовым объемом обеспечение взрывобезопасности достигается путем организации в нижнем и/или верхнем (рис. 2) фланцах специальных воздухопроводов, закрытых мембранами, сохраняющими герметичность ОПН. В случае внутреннего повреждения горение дуги в корпусе ОПН затруднено из-за возникающего повышенного давления.

Вследствие появления повышенного давления мембраны вскрываются, и через сопла, специально устанавливаемые на фланцах, ионизированные газы дуги выбрасываются наружу таким образом, чтобы облегчить условие возникновения и развития электрической дуги вдоль наружной поверхности ОПН, что уменьшает риск взрывного разрушения оболочки ОПН (рис. 3).

В аппаратах типа В без значительного внутреннего газового объема (как правило, аппараты с полимерной изоляцией) взрывобезопасность достигается иным образом. Неотъемлемым элементом ОПН с полимерной изоляцией является несущая механическую нагрузку конструкция из стеклопластика или сходного по свойствам материала, обычно размещаемая внутри внешней оболочки из кремнийорганической резины или силикона. Эта конструкция может быть выполнена в виде «плетеной» (тип В1а) или сплошной трубы (тип В1b), или нескольких стержней, закрепленных во фланцах (тип В2).

### Классификация конструкций ОПН по МЭК

Рис. 1 •



**Тип А:** между колонкой варисторов и корпусом имеется газовый объем, во фланцах предусмотрены клапаны для сброса давления; корпус выполняет как изолирующие функции, так и несет механическую нагрузку.

**Тип В:** внутри аппарата нет газового объема; механическая прочность обеспечивается специальной конструкцией из диэлектрика, размещенной между колонкой варисторов и наружной изоляцией:

**1а:** колонка варисторов обернута двумя встречно намотанными стеклопластиковыми жгутами («плетеная» конструкция);

**1b:** колонка варисторов помещена в стеклопластиковую трубу, а зазор между колонкой и трубой заполнен специальным наполнителем;

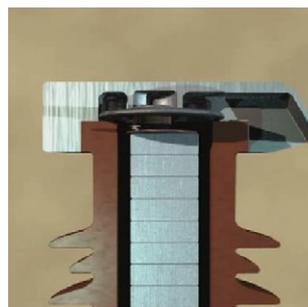
**2:** колонка варисторов размещена между несколькими стеклопластиковыми стержнями («стержневая» конструкция).

• Рис. 2

Рис. 3 •

Предохранительный клапан, организованный во фланце ОПН типа А

Работа предохранительного клапана при повреждении ОПН типа А

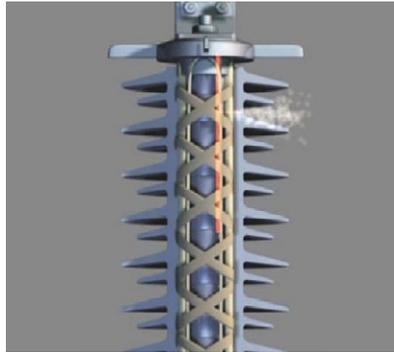


• Рис. 4 Внешний вид стеклопластиковой трубы с ослабленными местами, которые при повреждении ОПН типа В1b обеспечивают сброс давления в аппарате



• Рис. 5

Сброс давления в ОПН типа В2, имеющего отдельные стеклопластиковые стержни



В конечном счете, во всех полимерных аппаратах без внутреннего газового объема в несущей механическую нагрузку конструкции предусмотрены ослабленные в механическом отношении места, играющие роль диафрагмы, разрываемой при повышении давления внутри ОПН. И «плетеная» конструкция ОПН, и конструкция с трубой, имеющей несколько отверстий, преднамеренно высверленных в ее боковой поверхности (рис. 4), и конструкция ОПН со стержнями (рис. 5) позволяют сбрасывать давление внутри корпуса ОПН в радиальном направлении за счет «вскрытия» полимерной оболочки.

#### ИСПЫТАНИЯ ОПН НА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ

Процедуры испытаний на взрывобезопасность описаны в МЭК 60099-4 [2] и в недавно принятом отечественном ГОСТ Р 52725 [1], в котором за основу были приняты методики ГОСТ 16357 [5], использовавшиеся для аналогичных испытаний вентильных разрядников. Согласно [1,2] взрывобезопасность ОПН контролируется при большом и малом токах короткого замыкания, однако в методиках [1] и [2] имеются некоторые отличия (таблица 1 и 2).

По ГОСТ 52725 (табл. 1) заявленным большим током (20, 40 или 65 кА) проверяют два образца ОПН, подготовленные изготовителем к испытаниям путем установки проволоки, закорачивающей (шунтирующей) столб варисторов в аппарате.

По МЭК (табл. 2) испытаниям большим током должны быть подвергнуты три образца, причем один из них током заявленной величины, а два других при уменьшенных значениях тока (приблизительно  $0,4 \div 0,6$  и  $0,2 \div 0,4$  заявленной величины большого тока). Кроме того, установка закорачивающей проволоки по МЭК предусмотрена только для аппаратов с внутренним газовым объемом типа «А». Возникновение короткого замыкания в аппаратах без внутреннего газового объема типа В желательно воспроизводить путем предварительного приложения к испытываемому образцу повышенного напряжения в течение времени, необходимого для повреждения варисторов, так как для аппаратов без газового объема подобное испытание является более тяжелым и реалистичным (в предыдущей редакции – в аппаратах типа В рекомендовалось высверливать в варисторах столба отверстие в котором и размещать, как для случая аппаратов типа А, закорачивающую проволоку).

В редакции МЭК 2004 в пункте N.8.7.5 отмечается: *опыт с разрядниками в фарфоровых корпусах показал, что испытания при заявленном токе взрывобезопасности не обязательно подтверждают приемлемые свойства при более низких токах*. По нашему мнению этот опыт можно распространить на все аппараты типа А (рис.1), которые

Испытания ОПН на взрывобезопасность по ГОСТ 52725 (пример)

Таблица 1 •

Большой ток (кА), $T = 0,2$ с	Малый ток (А), $T = 2$ с
Образец №1 и №2	Образец №3
20	800
40	800
65	800

Испытания ОПН на взрывобезопасность по МЭК 60099-4 (пример)

Таблица 2 •

Заявленный ток короткого замыкания	Большой ток (кА), $T = 0,2$ с		Малый ток (А), $T = 1$ с
	Уменьшенные токи короткого замыкания	Образец №3	
Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4
20	12	6	600
40	25	12	600
63	25	12	600

имеют преднамеренно созданный объем, а материал корпуса существенного значения не имеет. Разработчики МЭК пошли дальше и ввели испытания уменьшенными величинами токов для ОПН всех типов, тогда как в ГОСТ такие дополнительные испытания пока отсутствуют.

Дальность разлета фрагментов конструкции ОПН зависит, помимо прочего, от высоты с которой они начинают свое движение, т.е. от высоты ОПН и, поэтому, максимально допустимый разлет осколков нормируется в зависимости от высоты аппарата. Ограничитель считается взрывобезопасным по ГОСТ, если в процессе испытаний все фрагменты конструкции, упавшие на землю, остались внутри ограждения высотой 40 см и диаметром  $D = 2H_{\text{ОПН}} + D_{\text{ОПН}}$ , где  $H_{\text{ОПН}}$  – высота и диаметр ОПН; для аппаратов малой высоты принимается  $D = 1,8$  м. Область распространения раскаленных газов, выходящих из ОПН, не нормируется.

В последней редакции МЭК диаметр круга увеличен на 20% и составляет  $D = 1,2(2H_{\text{ОПН}} + D_{\text{ОПН}})$ , а также считается допустимым вылет из круга фрагментов конструкции весом до 60 граммов каждый (ранее было только до 10 граммов).

#### ВЫБОР ТОКА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ И ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Производитель гарантирует взрывобезопасность своего ОПН при определенной совокупности воздействующих факторов, а именно при *токе короткого замыкания*, протекающем внутри корпуса ОПН в течение *определенного времени*. Проверка взрывобезопасности при указанных сочетаниях амплитуды тока КЗ и его длительности является обязательной согласно закону РФ «О техническом регулировании», а проверенные значения приводятся в заявляемых производителем характеристиках ОПН. Взрывобезопасность аппарата при сочетаниях воздействующих факторов, отличных от нормированных в ГОСТ, вообще говоря, никем не проверяется. Испытательные процедуры МЭК (таблица 2) дают в этом отношении гораздо больше уверенности в поведении ОПН при внутреннем повреждении, если в месте установки ОПН ток короткого замыкания имел величину, меньшую заявленной.

К сожалению, характер кривой  $I_{\text{ВБ}}(T)$  взрывобезопасности нельзя достоверно оценить только по двум полученным по результатам испытаний по ГОСТ экспериментально подтвержденным точкам. Поэтому, выбор ОПН по току взрывобезопасности на стадии проектирования должен быть таким, чтобы в предполагаемом месте установки ОПН сочетание реальной величины тока короткого замыкания  $I_{\text{КЗ}}$  и длительности его

протекания  $T$  было воздействием, близким к проверенному испытаниями, при котором производитель гарантирует взрывобезопасность ОПН.

Во-первых, время воздействия на ОПН тока КЗ определяется тремя основными составляющими:

$$T = T_{\text{СРЗ}} + T_{\text{ОТКЛ.ВЫКЛ.}} + T_{\text{УРОВ.}},$$

где  $T_{\text{СРЗ}}$  – время срабатывания защиты,  $T_{\text{ОТКЛ.ВЫКЛ.}}$  – собственное время отключения выключателя,  $T_{\text{УРОВ.}}$  – время срабатывания устройства резервирования отказа выключателя (по данным МЭС Центра  $T_{\text{СРЗ}} = 0,1$  с,  $T_{\text{УРОВ.}} = 0,25$  с). При нормальной работе выключателя ( $T_{\text{ОТКЛ.ВЫКЛ.}} = 0,05 \div 0,12$  с) время отключения КЗ составляет приблизительно  $T_{\text{УРОВ.}} = 0,2$  с, а при отключении с УРОВ оно будет заметно больше. Если за  $T = 0,2$  с электрическая дуга из корпуса ОПН будет выведена наружу, то взрывного разрушения ОПН не произойдет даже при более длительном горении дуги. Однако если дуга останется внутри корпуса, то взрывобезопасность ОПН при реальных временах  $T > 0,2$  с гарантировать нельзя.

Во-вторых, мы полагаем, что выбор «с запасом» ( $I_{\text{ВВ}} > I_{\text{КЗ}}$ ) не гарантирует взрывобезопасность даже при одном и том же времени  $T = 0,2$  с, что отметили разработчики МЭК на основе многолетнего опыта эксплуатации, введя испытания ОПН на взрывобезопасность не только заявленным большим током, но и двумя его уменьшенными значениями (таблица 2). В сетях 6–750 кВ в подавляющем большинстве случаев токи короткого замыкания не превышают 20–30 кА, т.е. на таких объектах нежелательно применение ОПН, испытанных помимо малого тока только большим током 40–65 кА.

Принимая во внимание перечисленные факты, широко используемое проектировщиками для проверки взрывобезопасности ОПН условие  $I_{\text{ВВ}} > I_{\text{КЗ}}$  является необходимым, но недостаточным (при испытаниях по МЭК предыдущих редакций или при испытаниях по ГОСТ [1]), а его выполнение не гарантирует взрывобезопасности.

В свое время отечественная экспериментальная база создавалась таким образом, чтобы ее возможности отвечали реальными токам короткого замыкания, существующим в сетях. Поэтому сейчас испытательные центры России могут проводить испытания оборудования токами короткого замыкания до 40 кА, и до недавнего времени этого было достаточно. Однако с учетом возросших токов короткого замыкания в настоящее время необходимо ставить вопрос о модернизации российской экспериментальной базы, поскольку на некоторых объектах токи короткого замыкания превосходят 40 кА.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксплуатации зафиксированы случаи взрывного разрушения ОПН отечественного и зарубежного производства с разлетом осколков в радиусе, заметно превышающем взрывобезопасные рамки. Это можно объяснить тем, что реальные сочетания токов короткого замыкания и времени их протекания существенно отличаются от испытательных.

Величина тока короткого замыкания, при которой проведены испытания ОПН на взрывобезопасность не должна заметно отличаться от ожидаемого уровня токов короткого замыкания в месте предполагаемой установки ОПН. В противном случае при повреждении ОПН система обеспечения его взрывобезопасности может не сработать должным образом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 52725-2007. «Ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические требования и методы испытаний». Введен с 1-го января 2008 г.
2. IEC 60099-4. Edition 4.0, 2006-05. Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems // International Electrotechnical Commission. Geneva, 2006.
3. С. Heinrich, S. Hayeb, W. Kalkner. Degradation and restoration of metal oxide surge arresters // 10th International symposium on high voltage engineering ISH-97, Canada, 1997.
4. Правила устройства электроустановок. 7-е изд.
5. ГОСТ 16357-83. Разрядники вентильные переменного тока на номинальное напряжение от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия: Межгос. стандарт. М.: Издательство стандартов, 1983. 26 с.