

## Энергетическая координация УЗИП и защищаемого оборудования

### Введение

Частой причиной выхода из строя электрооборудования являются импульсные перенапряжения. Импульсы перенапряжения могут быть вызваны различными электромагнитными помехами, возникающими в следствие грозовых разрядов, либо в следствии коммутационных перенапряжений и других переходных процессов в сети. На данный момент, одним из самых эффективных способов защиты аппаратуры от перенапряжений является установка УЗИП.

Когда конструкция входных цепей оборудования не обеспечивает соблюдение обязательных требований по стойкости изоляции к импульсным перенапряжениям, например, ГОСТ Р 50571-4-44-2011 или требованиям по ЭМС в соответствии с ГОСТ Р 51317, для прохождения процесса сертификации продукции производители оборудования могут устанавливать во входные цепи питания встроенную защиту от перенапряжений, в виде маломощного защитного элемента – варистора, разрядника или др., для повышения устойчивости оборудования к микросекундным импульсным помехам малой энергии (рис. 1а, 1б).

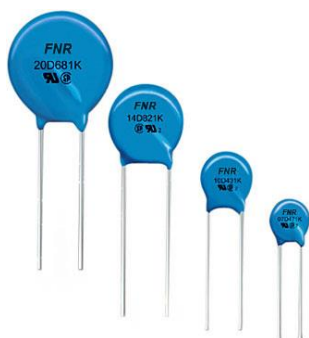


Рисунок 1а - Варисторы



Рисунок 1б – Газонаполненные разрядники

Для соответствия вышеуказанным требованиям оборудование должно выдержать испытания на генераторах импульсов перенапряжения. Критерием стойкости является сохранение работоспособности, отсутствие сбоев или быстрое восстановление.

Поскольку при обязательных испытаниях на ЭМС используют испытательные импульсы небольшой энергии, то для отведения таких импульсов достаточно маломощных элементов защиты, например, варисторов 5 кА 8/20 мкс или газонаполненных разрядников 10 кА. Сразу хотелось бы отметить частую ошибку применения газонаполненного разрядника в цепях питания (см. [Технический бюллетень TNP029 22.01.2018](#)).

Использование таких элементов экономически выгодно, в связи с чем возможностью установки в цепи оборудования защитных элементов активно пользуются производители (рис. 2).

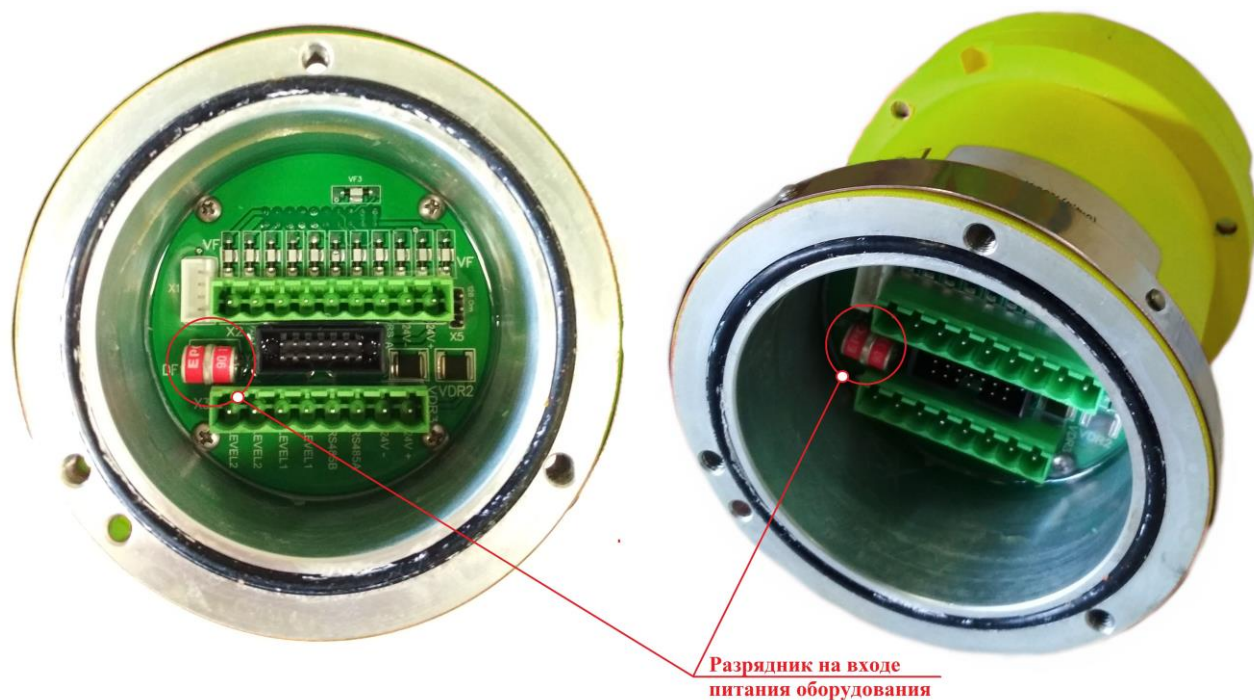


Рисунок 2 - Встроенный заводом-изготовителем защитный элемент

В реальных условиях эксплуатации на промышленных объектах оборудование подвергается воздействию мощных перенапряжений, наиболее опасными из которых являются грозовые. Вследствие таких воздействий оборудование может выходить из строя, несмотря на встроенные элементы. Кроме того, достаточно часто происходит возгорание маломощных защитных элементов, сопровождающееся выделением чёрной копоти и окалина, что приводит к замыканиям в цепи и, как итог, прекращению работы аппаратуры (рис. 3).

Для защиты объекта в целом, в соответствии с концепциями молниезащиты по ГОСТ Р МЭК 62305-1, применяется ряд мер, одной из которых является применение УЗИП на границе зон молниезащиты. УЗИП применяют в случае появления предполагаемого перенапряжения в защищаемой цепи, превышающего собственную стойкость изоляции оборудования. В зависимости от условий и типа защищаемых линий, величина импульсов может достигать больших величин. Например, для воздушной линии питания 0,4 кВ импульсы могут достигать значений в сотни кА с формой волны 8/20 мкс или 10/350 мкс.

Для защиты от перенапряжений применяют один или несколько каскадов УЗИП, способных отвести данное воздействие и защитить оборудование. При этом, в общем случае, защита выстраивается таким образом, чтобы УЗИП, ограничивая расчётное перенапряжение, обеспечивал необходимый для исправной работы оборудования уровень защиты  $U_p$ . Но в случае наличия встроенных в оборудование защитных элементов, задача усложняется, т.к. появляется необходимость в координации УЗИП с защитными элементами, установленными внутри оборудования.

В случае отсутствия координации, встроенные маломощные варисторы и разрядники испытывают на себе мощный импульс тока, вследствие чего выходят из строя. Несогласованность работы между элементами защиты может оказаться опасной для современной аппаратуры.

Следует отметить, что координация УЗИП и встроенных элементов защиты задача сложно реализуемая на практике и должна решаться не позднее чем на этапе проектирования.

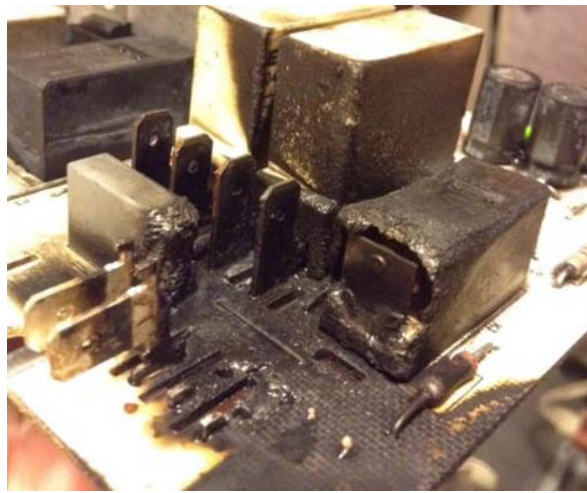


Рисунок 3 - Последствия возгорания маломощного варистора

### Возможные варианты энергетической координации защит

В случае, когда в электрической цепи присутствует два или более устройства защиты, между ними будет возникать взаимодействие, и, если данные защитные элементы выбраны некорректно, появляется риск возникновения недопустимого перенапряжения на менее мощном защитном элементе. Защитный элемент с более низким максимальным длительным рабочим напряжением  $U_c$ , будет иметь склонность пропустить через себя более высокий ток, так как обладает более низким полным эффективным импедансом.

Главной целью координации является создание условий, при которых энергия импульсов проходила бы по пути тока от более мощных элементов защиты к менее мощным, при этом уменьшаясь в значении до допустимого для последующих элементов (Рис. 4).

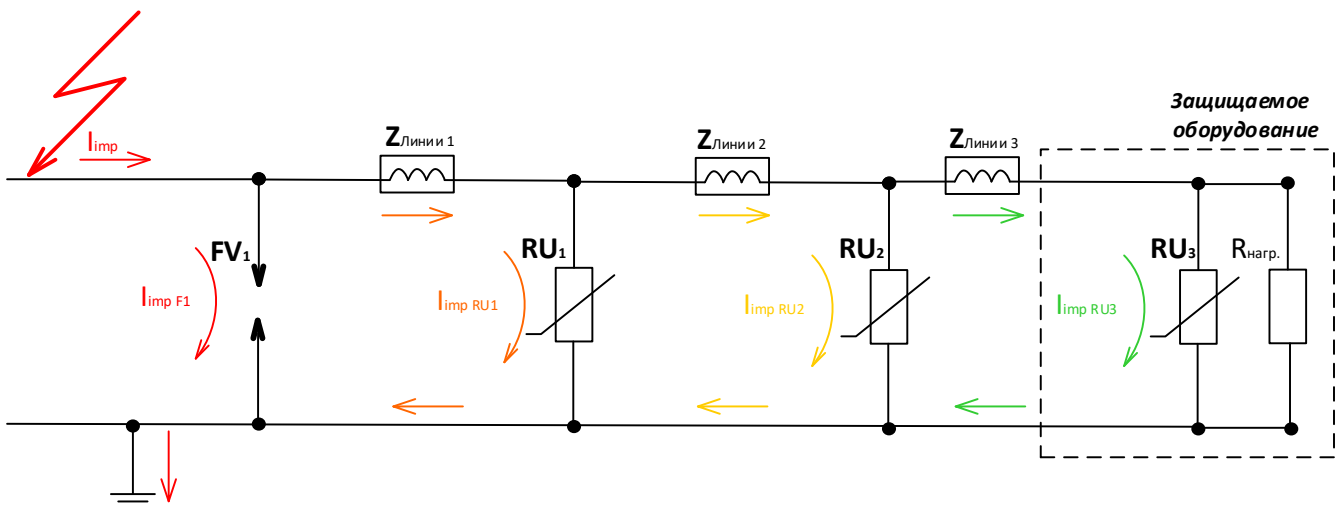


Рисунок 4 - Принцип координации УЗИП

### Энергетическая координация между элементами ограничивающего типа

Координация между элементами ограничивающего типа без разъединяющих элементов может быть осуществлена посредством подбора их характеристик. Для формы волны 10/350мкс индуктивность не очень эффективна. Если это возможно, то следует обеспечить координацию за счет применения резистивных элементов разъединения (или собственного сопротивления кабелей) (рис. 5).

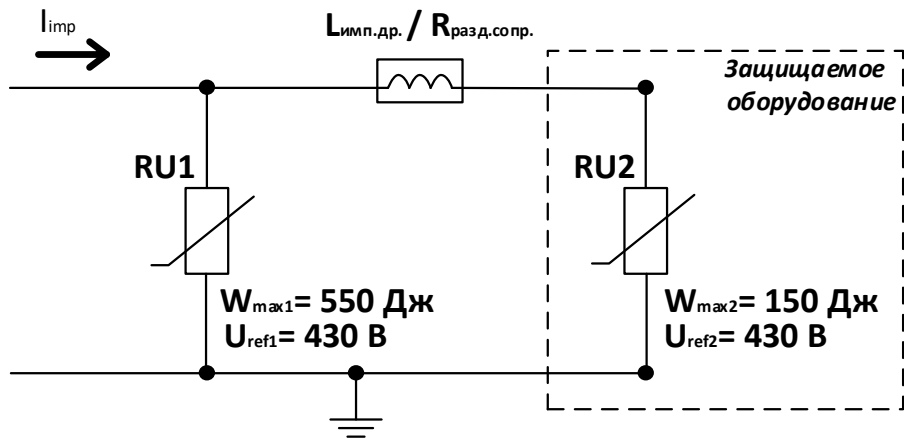


Рисунок 5 – Координация элементов защиты ограничивающего типа

Ещё одним способом координации может быть подбор ограничивающих элементов по максимально допустимому длительному рабочему напряжению  $U_c$ . В случае если  $U_c$  элемента  $RU_2$  будет превышать  $U_c$  элемента  $RU_1$ , при воздействии импульсного тока, элемент  $RU_1$  откроется раньше, отводя при этом большую часть тока импульса перенапряжения.

При правильной координации в цепи с элементами ограничивающего типа, импульсный ток протекающий через  $RU_2$  не должен превышать ток, протекающий через  $RU_1$ . К тому же ток через  $RU_2$  не должен превышать допустимого для  $RU_2$  значения (рис. 6).

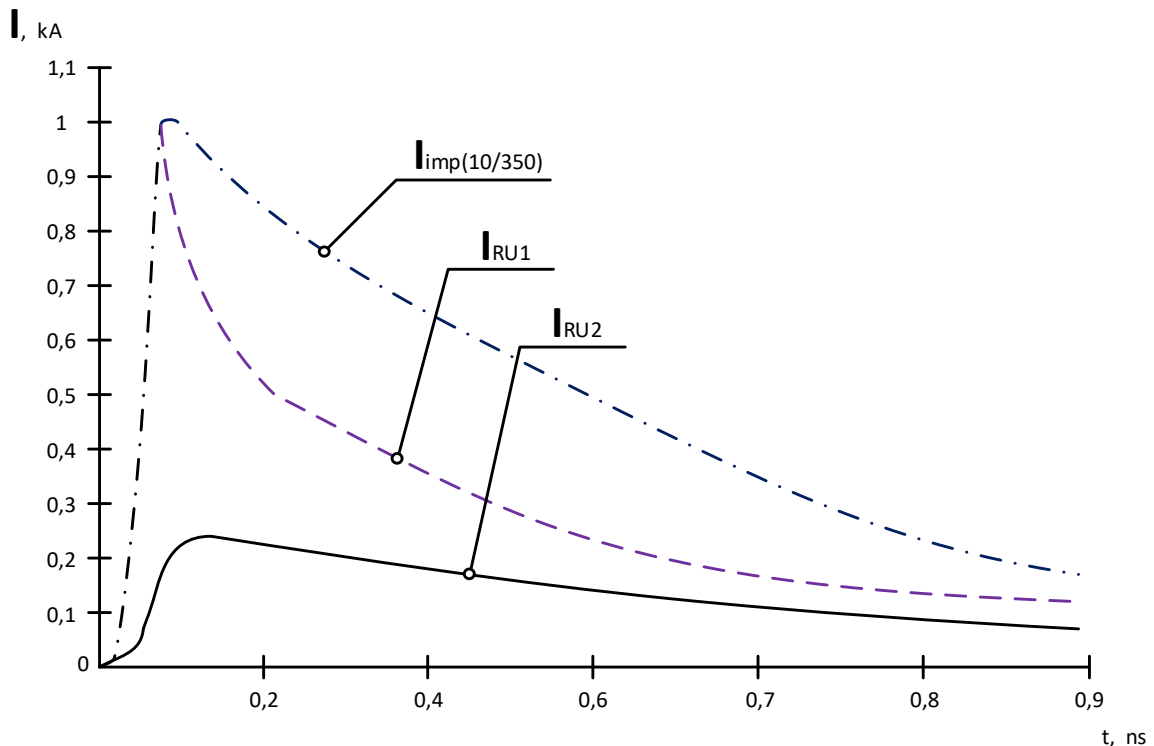


Рисунок 6 – Зависимости тока от времени для двух ограничивающих напряжение элементов

### Координация между элементами коммутирующего и ограничивающего типа

В случаях, когда во входных цепях оборудования заводом-изготовителем устанавливается защитный элемент коммутирующего типа, в виде разрядника, а в электросети - УЗИП на базе ограничивающего элемента – варистора, к энергетической координации можно отнестись более нейтрально (рис. 7). Это связано с тем, что время срабатывания варистора колеблется в пределах 25 нс, а время срабатывания газонаполненного разрядника колеблется в пределах 100 нс. Соответственно, в теории, варистор должен сработать раньше разрядника и принять на себя весь импульс перенапряжения. Однако, к вышеописанной рекомендации не нужно относиться

догматично, т.к. достоверную информацию по координации в данном случае можно выяснить только путём проведения лабораторных испытаний.

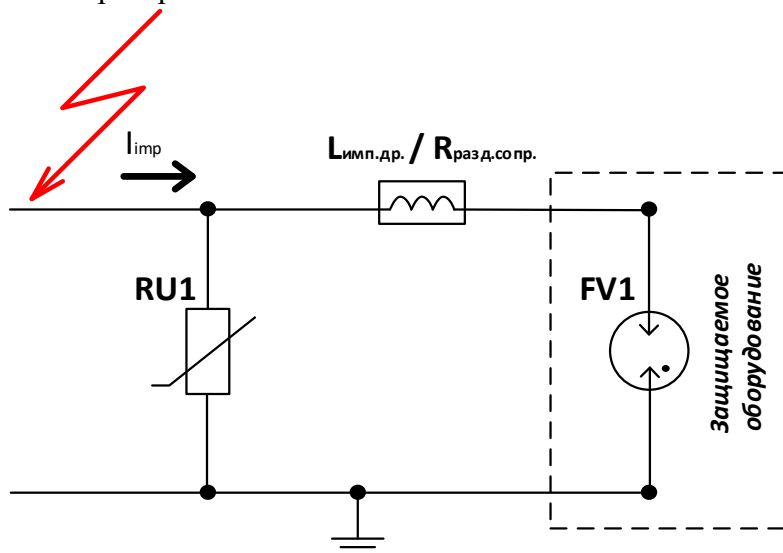


Рисунок 7 – Газонаполненный разрядник в питающей цепи оборудования

### Координация между УЗИП коммутирующего напряжение и УЗИП ограничивающего напряжение

На рисунке 8 приведена основная схема для этого вида координации. Пробой разрядника УЗИП  $FV_1$  зависит от суммы остаточного напряжения  $U_{ref}$  на ограничивающем элементе  $R_{U1}$  и динамического падения напряжения на разъединяющем элементе  $U_{DE}$ . Бытует мнение, что разрядник в первом каскаде проще скоординировать с варистором, но мёртвая зона, в которой не происходит пробой разрядника, а также наличие сопровождающего тока делают эту комбинацию менее надёжной и непредсказуемой. В такой схеме возможны несколько результатов, в зависимости от соответствующих параметров элементов, импульсного тока и разъединяющего импеданса:

а) нет пробоя разрядника, «мёртвая зона». В таком случае весь импульсный ток течет через  $R_{U1}$ . Поэтому, для того, чтобы не потерять работоспособность,  $R_{U1}$  должен иметь определённую энергоёмкость относительно выделяемой энергии, от действия этого импульсного тока. Маломощные защитные элементы, устанавливаемые производителями оборудования, не обладают высокой энергоёмкостью (рис. 9).

б) есть пробой разрядника. В этом случае пробой разрядника изменяет форму волны импульса, воздействие которой определяет ток, отводимый  $R_{U1}$  (рис. 10).

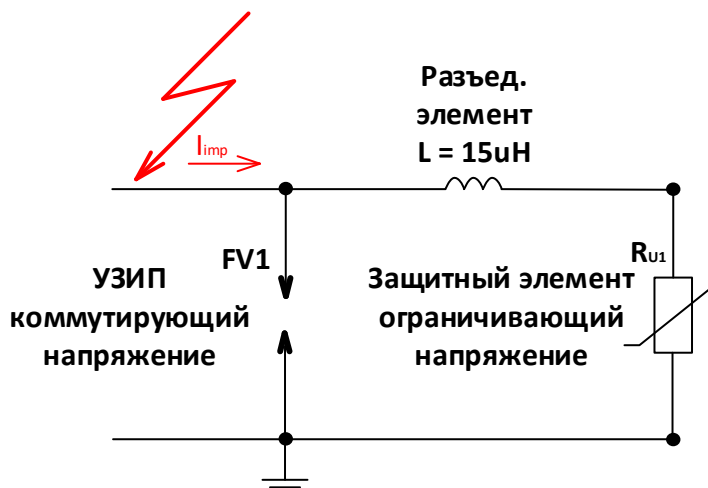


Рисунок 8 - Схема координации

До пробоя, распределение напряжений между  $FV_1$  и  $RU_1$  определяется соотношением

$$U_{FV} = U_{res} + U_{DE},$$

где:

$U_{FV}$  – напряжение на разряднике;

$U_{res}$  – напряжение на  $RU_1$  для импульсного тока  $i$ ;

$U_{DE}$  – падение напряжения на разъединяющем элементе для  $di/dt$ .

Координация достигнута, когда  $U_{FV}$  превышает динамическое пробивное напряжение на разряднике.

Это условие зависит только от характеристики  $RU_1$ , скорости изменения тока воздействующего импульса, характера разъединяющего элемента и динамического пробивного напряжения разрядника.

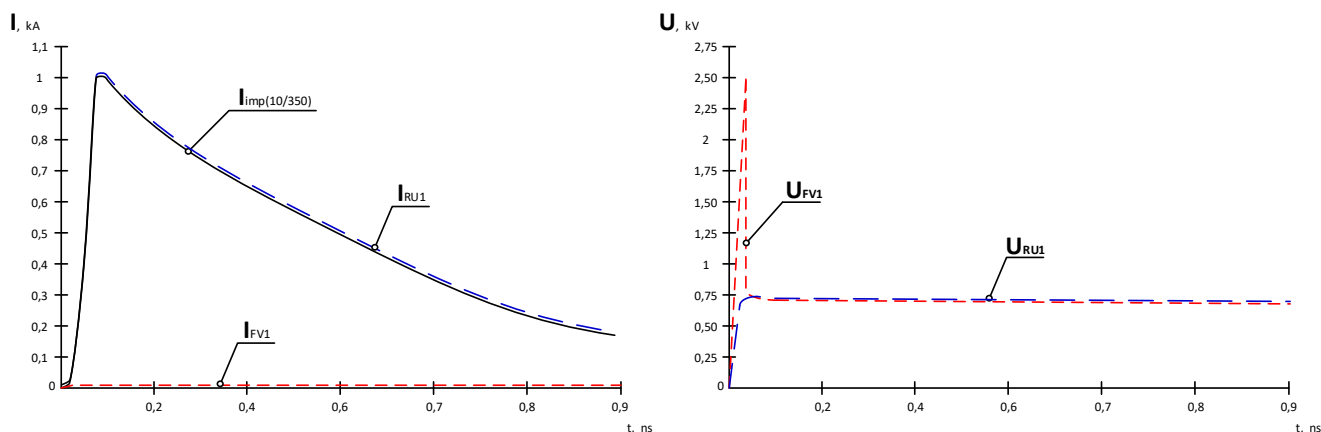


Рисунок 9 - Характеристика тока и напряжения для схемы разрядник – варистор, при отсутствии пробоя

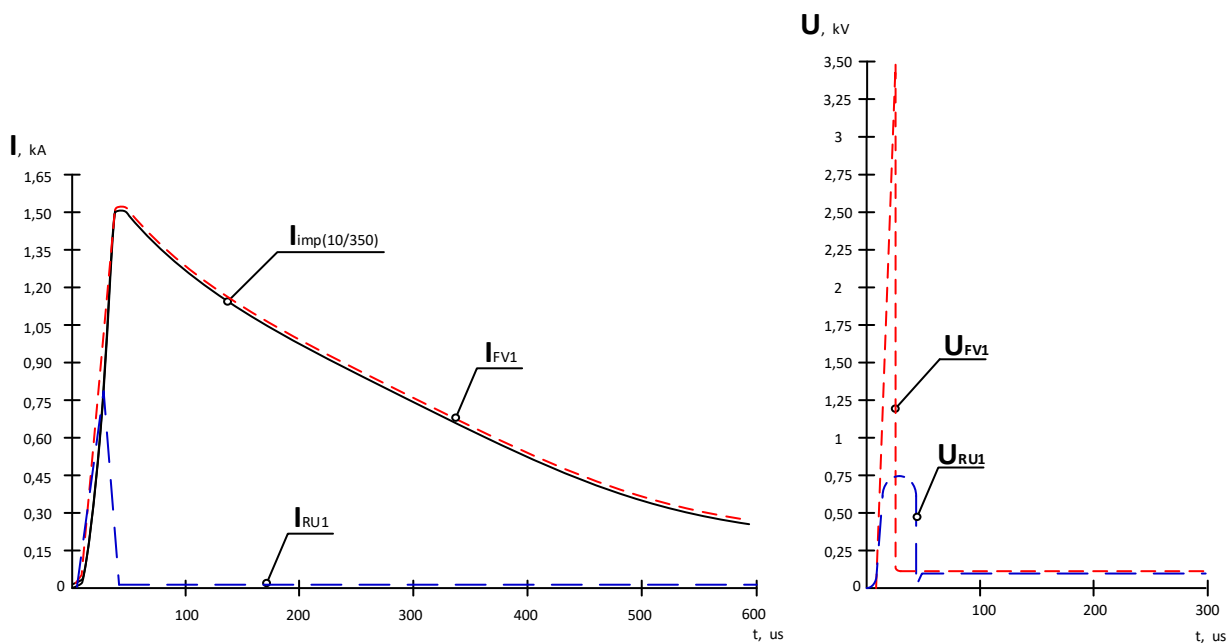


Рисунок 10 - Характеристика тока и напряжения для схемы разрядник – варистор, при пробое

### Координация между коммутирующими элементами защиты

Рисунок 11 иллюстрирует координацию разрядников. Для координации разрядников необходимо использовать их динамические рабочие характеристики.

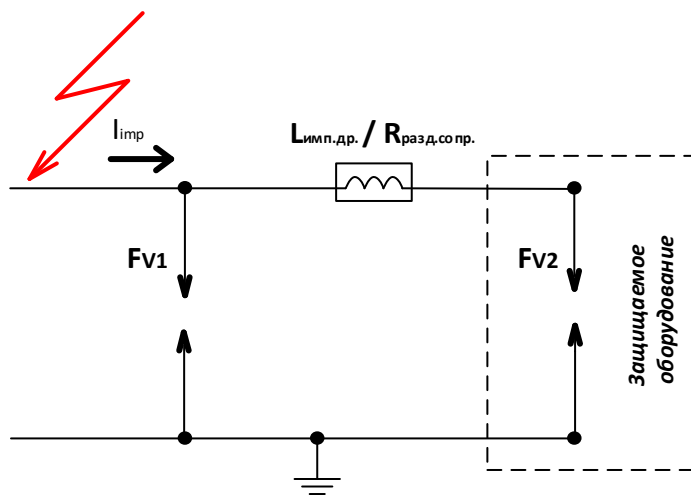


Рисунок 11 - Координация защитных элементов коммутирующего типа

Если координация была выполнена правильно, то первым пробой произойдёт в разряднике  $F_{V2}$ , а затем  $F_{V1}$ . После пробоя  $F_{V2}$ , координация будет обеспечена посредством разъединяющего элемента. Чтобы определить необходимые параметры разъединяющего элемента  $F_{V2}$ , может быть проведён опыт короткого замыкания. Для срабатывания  $F_{V1}$  необходимо, чтобы динамическое падение напряжения на разъединяющем элементе было выше, чем напряжения пробоя  $F_{V1}$ . Если в качестве элемента разъединения используется индуктивность, то необходимо рассмотреть форму волны (особое значение  $di/dt$ ).

При использовании сопротивлений максимальное значение импульса является определяющим при расчете сопротивления резистивного разъединяющего элемента. Падения напряжения в резисторах, вызванные импульсным током, следует учитывать при выборе параметров импульсных устройств.

## Оценка координации

В ГОСТ Р 55630-2013 п.12.5. приводятся пять различных способов оценки координации. Некоторые из этих методов трудны в применении, так как для их осуществления могут потребоваться точные характеристики оборудования и УЗИП. Но координация защитных элементов необходима для максимально рентабельного и эффективного использования ресурсов.

Способы оценки координации двух УЗИП по ГОСТ Р 55630-2013 п.12.5:

- а) использование рекомендованных комбинаций УЗИП;
- б) вычисление координации;
- в) допустимость применения согласно энергетической концепции;
- г) проведение испытаний на координацию конкретного оборудования с конкретным УЗИП;
- д) применение упрощённых табличных методов.

## Рекомендации производителя

Рассматривая вышеописанные методы координации, хотелось бы начать с наших рекомендаций, учитывая, что АО «Хакель Рос» имеет большой опыт работы в области защиты от импульсных перенапряжений. Наши УЗИП испытаны на координацию между собой в лабораторных условиях. Кроме того, правильность координации подтверждена многолетней безупречной эксплуатацией УЗИП на различных объектах наших заказчиков.

При установке защитных устройств необходимо, чтобы расстояние между соседними ступенями защиты было не менее 10 метров по кабелю. Выполнение этого требования необходимо для правильной работы и координации срабатывания устройств. В случае необходимости размещения УЗИП на более близком расстоянии или рядом, необходимо использовать «искусственную линию задержки» в виде импульсного разделительного дросселя с индуктивностью не менее 6-15 мкГн. Пример такого разделения приведён на рисунке 12.

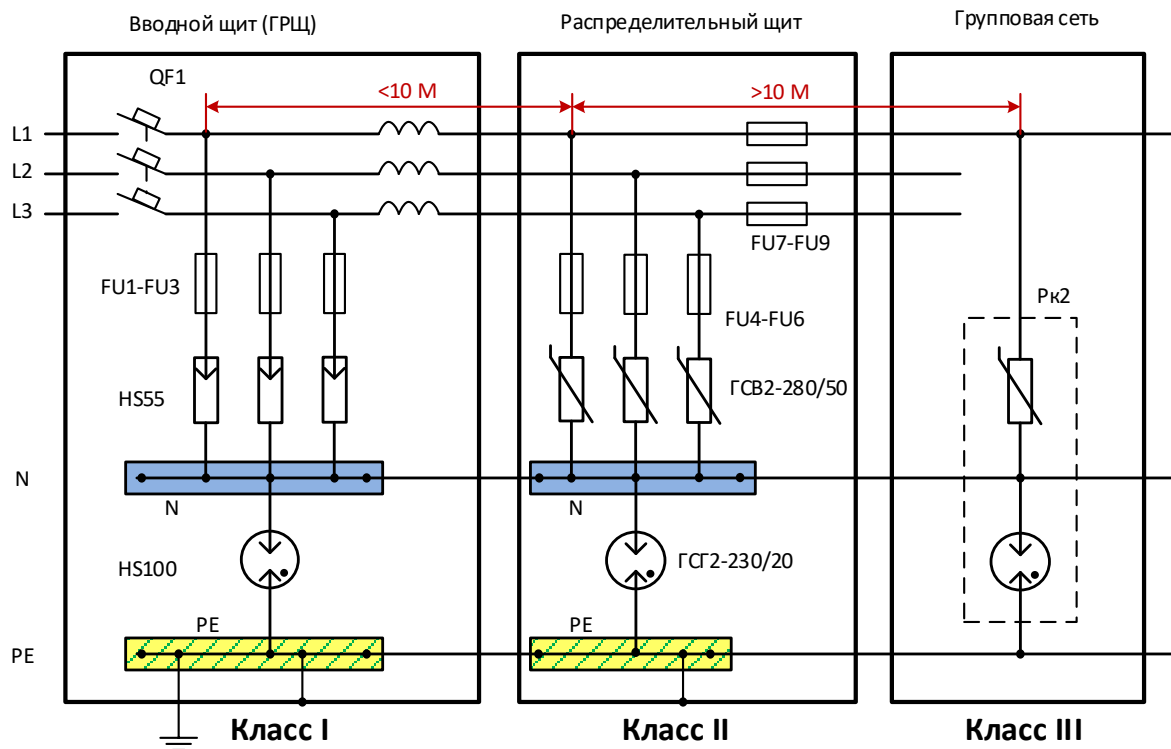


Рисунок 12 - Координация трёх ступеней УЗИП

### Вычисление координации

Посредством компьютерного моделирования сложные электрические системы могут быть исследованы с выполнением параметрических оценок цепей в широком диапазоне значений. Однако, применять такой метод координации устройств на практике не всегда представляется возможным.

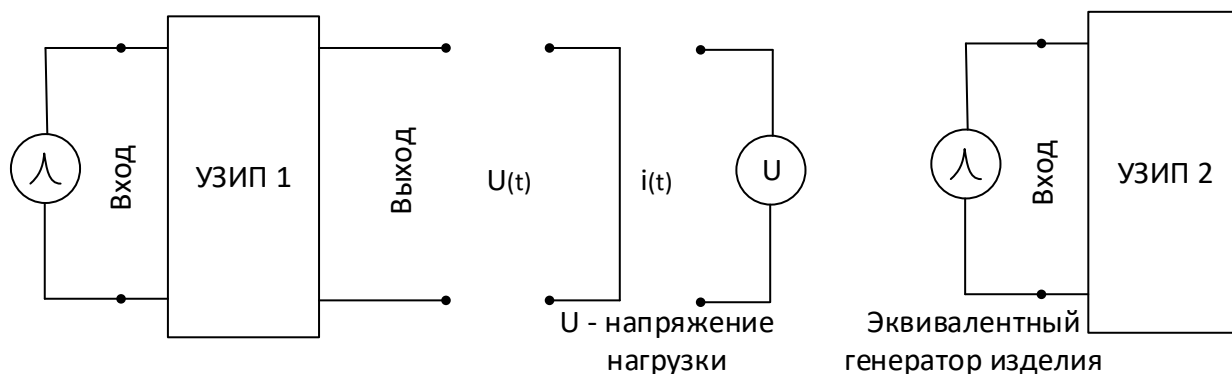
Для проведения расчётов необходимо иметь подробные характеристики устройств, в том числе кривые ВАХ для расчёта координации, что делает расчёты относительно сложными. При этом не у всех потребителей и проектных организаций есть возможность пользоваться таким методом. Ситуация усложняется тем, что производители оборудования не всегда указывают технические данные по встроенным в оборудование защитам.

### Энергетический метод координации

Данный метод, со стандартными импульсными параметрами, является процедурой по выбору координации УЗИП. Основное преимущество этого метода – возможность рассмотреть УЗИП как «чёрный ящик» (см. рисунок 13). При этом подходе, для данного импульсного перенапряжения во входном порту, определяется не только напряжение разомкнутой цепи, но также определяется и выходной ток, например, при коротком замыкании на входных зажимах. Это позволяет применить энергетический принцип. Эти входные характеристики преобразовываются в эквивалентную 2 Ом комбинированную волну (разомкнутая цепь напряжение 1,2/50 мкс, короткозамкнутая цепь ток 8/20 мкс). Преимущество этого метода заключается в том, что нет никакой потребности в специальных знаниях внутренней конструкции УЗИП.

Это обеспечивает удовлетворительные результаты, когда характеристики УЗИП 1 настолько отличаются от характеристик УЗИП 2, что условия импульсного перенапряжения на УЗИП 2 являются квазизависимыми от текущего состояния. Например, это условие выполняется в случае координации между искровым разрядником и варистором.





Преобразование в стандартный импульс 1,2/50 мкс, 8/20 мкс с  $Z_i = 2$  Ом.

Рисунок 13 - Энергетический метод со стандартными параметрами импульсов

### Проведение испытаний на координацию

Данный способ определения координации УЗИП со встроенными защитными элементами, является приоритетным в случаях, когда производители оборудования не указывают данные о параметрах встроенной защиты. В момент проведения испытаний, к испытываемому оборудованию относятся как к «чёрному ящику», т.к. отсутствует информация о его внутреннем содержимом. Испытания проводятся для заданного диапазона токов импульсного воздействия, так, чтобы были определены все «мёртвые зоны» взаимодействия УЗИП с защитным элементом, встроенным в конкретное оборудование. Испытания могут проводиться с УЗИП ограничивающего, коммутирующего и комбинированного типа. В лаборатории АО «Хакель Рос» имеются генераторы токов, позволяющие проводить испытания в широком диапазоне импульсных токов. Мы проводим совместные испытания с производителями оборудования. Наша лаборатория имеет сертификаты и технические возможности для проведения всех типов подобного рода испытаний.



Рисунок 14 - Лабораторное оборудование Хакель Рос

### Применение упрощённых табличных методов

В ГОСТ Р 55630-2013 (Приложение Е) приводятся упрощённые табличные значения, включающие данные для координации некоторого типового УЗИП, когда никакие другие данные не известны. Значения, приведённые в этих таблицах, основаны на достаточном объёме данных, чтобы покрыть несоответствия между разными изготовителями и с учётом производственных допусков. Пример такой координации приведён в таблице №1.

Таблица 1 – Пример координации между УЗИП класса II

Первое УЗИП, испытанное по II классу			Второе УЗИП, испытанное по II классу			Минимальное расстояние между УЗИП, м
U <sub>p</sub> , кВ	I <sub>n</sub> , кА	I <sub>max</sub> , кА	U <sub>p</sub> , кВ	I <sub>n</sub> , кА	I <sub>max</sub> , кА	
2,5	40	20	10	5	1,8	10
					1,5	15
					1,2	20
					1,0	25
2,5	20	10	4	2	1,8	10
					1,2	15
					1,0	20
					1,5	10
2,0	40	20	10	5	1,8	5
					1,5	10
					1,2	10
					1,0	15
2,0	20	10	4	2	1,8	5
					1,2	10
					1,0	10
1,8	40	20	10	5	1,2	5
					1,0	10
					1,5	5
					1,2	10
	20	10	10	5	1,5	5
4			2	1,2	10	
					1,0	10

Эквивалентное расстояние даётся на основе 1 мкГн/м расстояния между двумя УЗИП. Поэтому, 10 м соответствуют 10 мкГн и наоборот.

### Заключение

Для обеспечения координации УЗИП с оборудованием вышеописанными методами необходимо, чтобы производители предоставляли подробную информацию о встроенных защитных элементах, согласно с п.10.3 ГОСТ Р 55630-2013.

#### 10.3 Предотвращение непоправимого ущерба

*Защитные меры могут быть приняты в самом оборудовании. В этом случае информация должна быть предоставлена изготовителем, чтобы оценить потребности в дальнейшем уменьшении импульсного перенапряжения. Неправильно воспринятая информация о характере импульсного перенапряжения может привести к неправильному выбору УЗИП и снижению системной надежности. Некоторые электронные устройства, в особенности с импульсным источником питания, который включает входной конденсатор большой емкости, являются примером того, когда уровень собственной помехозащищенности возрастает незначительно, а потери из-за неправильно выбранного УЗИП могут быть существенными.*

Если этого не учитывать, то через встроенные защитные элементы и УЗИП могут протекать не допустимые токи. При таком развитии событий, защитные элементы, устанавливаемые производителями на платах оборудования, выгорают сами и выжигают близ расположенные электрические цепи оборудования.

Мы, как производители УЗИП и специалисты по защите от перенапряжений, призываем проектные организации, разрабатывающие разделы, связанные с ЭМС и молниезащитой, учитывать возможность наличия встроенных в оборудование защитных элементов и координировать их с применяемыми УЗИП.

Также призываем производителей оборудования с осторожностью использовать встроенные защитные элементы и брать во внимание следующие моменты:

- не использовать маломощные элементы, т.к. с ними зачастую невозможно добиться координации, а при необходимости применять внешние УЗИП с известными параметрами и способом координации рекомендованным производителем УЗИП, что допустимо нормативными документами;

- при использовании встроенной защиты обязательно указывать в документации информацию о её наличии и параметрах;

- использовать рекомендованные комбинации УЗИП;

- проводить испытания на координацию и стойкость к предполагаемым перенапряжениям оборудования с предполагаемыми к применению на объекте размещения вышестоящими УЗИП.

### **Литература:**

1. ГОСТ Р 55630 – 2013. Перенапряжения импульсные и защита от перенапряжений в низковольтных системах переменного тока.
2. ГОСТ ИЕС 61643 – 11 – 2013. Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 11. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединённые к низковольтным системам распределения электроэнергии. Требования и методы испытаний.
3. Технические материалы АО «Хакель Рос».