

Принципы координации УЗИП



В статье рассмотрены вопросы координации устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) и защитного расстояния УЗИП разных классов. Приводятся условия скоординированной работы двух УЗИП и типичный диапазон зоны защиты.

АО «НПО «Стример», г. Санкт-Петербург

Устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) являются технически эффективным и экономически выгодным средством ограничения перенапряжений, возникающих в результате воздействия молнии и коммутаций в сети. При нарастании волны до уровня срабатывания варистора или разрядника УЗИП ограничение перенапряжения происходит практически мгновенно, в течение долей микросекунды, за счет резкого снижения сопротивления и протекания импульсного тока через рабочий элемент. Однако энергия, поглощенная варистором (реже — разрядником) во время этого процесса, может превысить допустимую, что приведет к повреждению УЗИП и функционированию оборудования без защиты. Для уменьшения энергетической нагрузки применяется в том числе каскадная защита, когда ток молнии делится между двумя УЗИП. Первая тема, рассмотренная в статье, касается координации работы двух УЗИП — можно ли поставить в каскад два УЗИП на базе варисторов, как должны соотноситься их уровни защиты и как «переключить» ток на более мощную ступень.

Даже если УЗИП обладает достаточной энергетической стойкостью, а его уровень защиты ниже уровня импульсной прочности изоляции, оборудование может повредиться. Это возможно, если оборудование находится между источником воздействия и УЗИП, и перенапряжение на нагрузке нарастёт до критического значения быстрее, чем придет отраженная волна от сработавшего УЗИП. Как определить зону защиты и скоординировать УЗИП и защищаемое оборудование? Этот вопрос также обсуждается в настоящей статье.

Вопросы координации и защитного расстояния УЗИП рассмотрены в ГОСТ Р МЭК 61643-12 (п. 6.2.6, Приложение F) и ГОСТ Р 55630-2013 (п. 12, Приложение E). Однако боль-

шой объем информации, сложной для восприятия, в совокупности с не всегда удачным переводом привели к необходимости интерпретировать эти вопросы для практического применения.

Типовая схема каскадной защиты здания предполагает установку УЗИП:

- ▶ I класса на вводе (ВРУ, ГРЩ, щит учета на опоре);
- ▶ II класса в РЩ (этажные щиты);
- ▶ III класса около оборудования.

На практике определено, что:

- ▶ УЗИП III класса ставится как можно ближе к защищаемому оборудованию — на расстоянии до 5 м;
- ▶ расстояние между УЗИП I, II и III классов должно составлять не менее 10 м;
- ▶ достаточно одного УЗИП I или II класса, если его уровень ограничения перенапряжения отвечает импульсной стойкости изоляции защищаемого оборудования и расстояние между УЗИП и оборудованием не превышает 30 м.

Указанные расстояния относятся к понятию «координация работы УЗИП» и определяются волновыми процессами распространения перенапряжений и растекания токов по элементам сети, связанными с параметрами молниевое воздействие, параметрами сети, характеристиками УЗИП и защищаемой нагрузки.

Диоды применяются обычно только в телекоммуникационных УЗИП,

поэтому далее в качестве рабочих элементов силовых УЗИП рассматриваются разрядники и варисторы (рис. 1).

Возможны два случая совместной работы УЗИП и оборудования, требующие координации:

- ▶ два УЗИП (задача — перераспределить ток молнии между двумя УЗИП так, чтобы не было превышено допустимое энергетическое воздействие):
 - оба УЗИП на базе варисторов;
 - варистор и разрядник;
- ▶ УЗИП и защищаемое оборудование (задача — определить зону защиты УЗИП):
 - УЗИП III класса и оконечное оборудование — взаимное расположение источника воздействия, УЗИП и нагрузки однозначно определено, важно предотвратить увеличение напряжения сверх уровня защиты УЗИП на участке между УЗИП и оборудованием;
 - УЗИП I или II класса и оборудование — при расположении оборудования между источником перенапряжений и УЗИП важно найти расстояние, в пределах которого «отклик» от УЗИП достигнет оборудования раньше, чем на нем нарастет критическое напряжение.

Координация между двумя УЗИП

Условия координации

Координация совместной работы УЗИП необходима для распределения импульса тока молнии между УЗИП в соответствии с их энергетической стойкостью. При решении данной задачи должны рассматриваться два условия:

- ▶ одновременное срабатывание обоих УЗИП;
- ▶ доля тока молнии через каждое УЗИП и их энергетическая нагрузка не должны превышать допустимые значения.

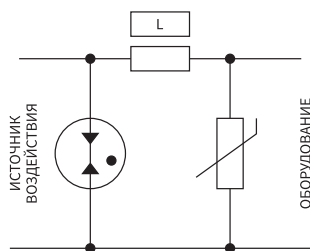


Рис. 1. Классическое расположение нелинейных элементов в каскадной схеме защиты: разрядник — индуктивная развязка — варистор

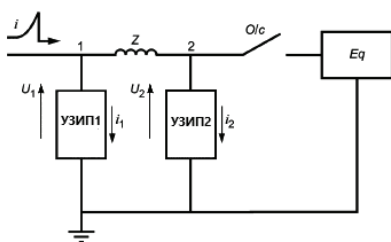


Рис. 2. Применение двух УЗИП для защиты оборудования E_q (нормально отключено от питания): i – импульс тока. Иллюстрация из ГОСТ Р МЭК 61643-12-2011

На рис. 2 приведена схема двухступенчатой защиты оборудования.

При отсутствии координации большая часть тока потечет через более «слабое» УЗИП2 с меньшим уровнем ограничения напряжения¹, что приведет к его повреждению. Поэтому первая задача координации работы УЗИП – своевременное срабатывание первой ступени каскада (УЗИП1) и отвод тока молнии в эту ступень. Это должно произойти до того момента, как нарастающий ток через сработавшее «слабое» УЗИП2 приведет к превышению его энергетической стойкости. Срабатывание более мощного УЗИП1 достигается за счет приложения к его выводам добавочного напряжения $\Delta U = L di/dt$, нарастающего на разделяющем ступени индуктивном сопротивлении L (то есть индуктивность между УЗИП определяет разницу напряжений, приложенных к УЗИП1 и УЗИП2). Напряжение на УЗИП1 определяется как:

$$U_1 = U_2 + L di_2/dt,$$

где U_2 – напряжение на выводах УЗИП2, которое можно принять равным уровню остающегося напряжения на УЗИП2 либо его классификационному напряжению, если УЗИП2 – варистор (получится заниженное значение, но такой вариант допускается ГОСТ).

Индуктивным сопротивлением, как правило, служит проводник необходимой длины.

Для выполнения первого условия координации напряжение U_1 должно превысить напряжение пробоя разрядника (динамическое) или срабатывания варистора в УЗИП1. После срабатывания УЗИП1 через него начнет проте-

кать ток i_1 , соответственно, произойдет снижение величины тока через УЗИП2.

Координация по первому условию может быть не достигнута, если:

- ▶ напряжение U_2 слишком низкое, а U_1 – слишком высокое (выбраны УЗИП с сильно различающимися уровнями защиты);
- ▶ индуктивность L мала (недостаточное индуктивное сопротивление между УЗИП);
- ▶ скорость нарастания тока di_2/dt низкая (пологий фронт волны).

Для выполнения второго условия координации энергия импульсного воздействия при протекании через УЗИП изменяющегося тока молнии не должна превосходить допустимое значение. Риск перегрузки подвергается главным образом УЗИП2.

Энергия, поглощаемая УЗИП за время протекания через него импульса тока молнии, определяется как:

$$W = \int i(t) \cdot U(t) \cdot dt,$$

где $i(t)$ – мгновенное значение тока через рабочий элемент УЗИП (разрядник или варистор), $U(t)$ – мгновенное напряжение на выводах УЗИП.

Координация по второму условию может быть не достигнута, если ток через УЗИП1 или время его протекания недостаточны для разгрузки по току УЗИП2, из-за чего поглощенная им энергия превысит его энергостойкость.

Влияние параметров импульса и типа УЗИП

Импульс тока молнии имеет аperiодическую форму, характеризующуюся участком нарастания (фронт) и спада (хвост) (рис. 3). Параметры волны тока молнии (крутизна, амплитуда, длительность) – вероятностные величины, соотношения между ними могут варьироваться. Разделяют короткие волны (например, 8/20 мкс) и длинные (например, 10/350 мкс). Скорость изменения тока (крутизна) на фронте волны имеет порядок (1–10) кА/мкс. В точке максимального значения тока производная тока $di/dt = 0$.

Тип рабочего элемента имеет существенное значение для перераспределения тока между УЗИП. Если сопротивления двух УЗИП на базе варисторов и падение напряжения на них примерно одинаковые, то ток импульса i поделится примерно пополам между УЗИП1 и УЗИП2. Координация может быть не достигнута, если УЗИП2 будет недостаточно разгружено. В случае если УЗИП1 – разрядник, то напряжение на его воздушном зазоре после пробоя минимально (порядка 50 В), поэтому можно считать, что весь ток с момента срабатывания УЗИП1 на фронте волны и до окончания импульса пройдет через него. В этом случае координация будет достигнута.

На рис. 4 схематично показано распределение токов и напряжений при воздействии импульса тока молнии в схеме с двумя УЗИП. Случай а – оба УЗИП на базе варисторов, случай б – первая ступень УЗИП на базе разрядника, вторая – на базе варистора.

Предположим, что уровень защиты U_{p1} УЗИП1 выше уровня защиты U_{p2} УЗИП2. Принято, что в момент возникновения импульса $t = 0$ сработало УЗИП2, напряжение на УЗИП2 и нагрузке ограничено до уровня U_2 .

Рассмотрим координацию двух варисторов (рис. 4а). Для первого случая приняты следующие допущения:

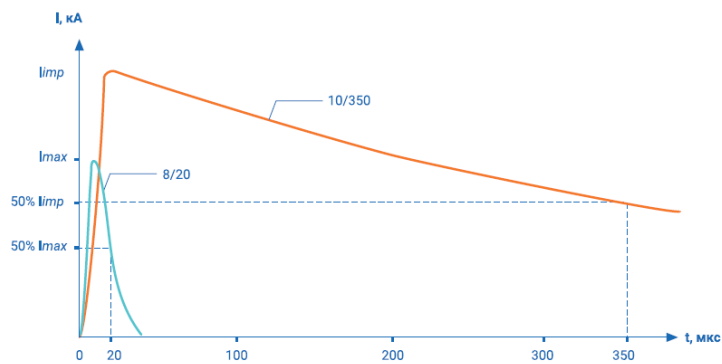
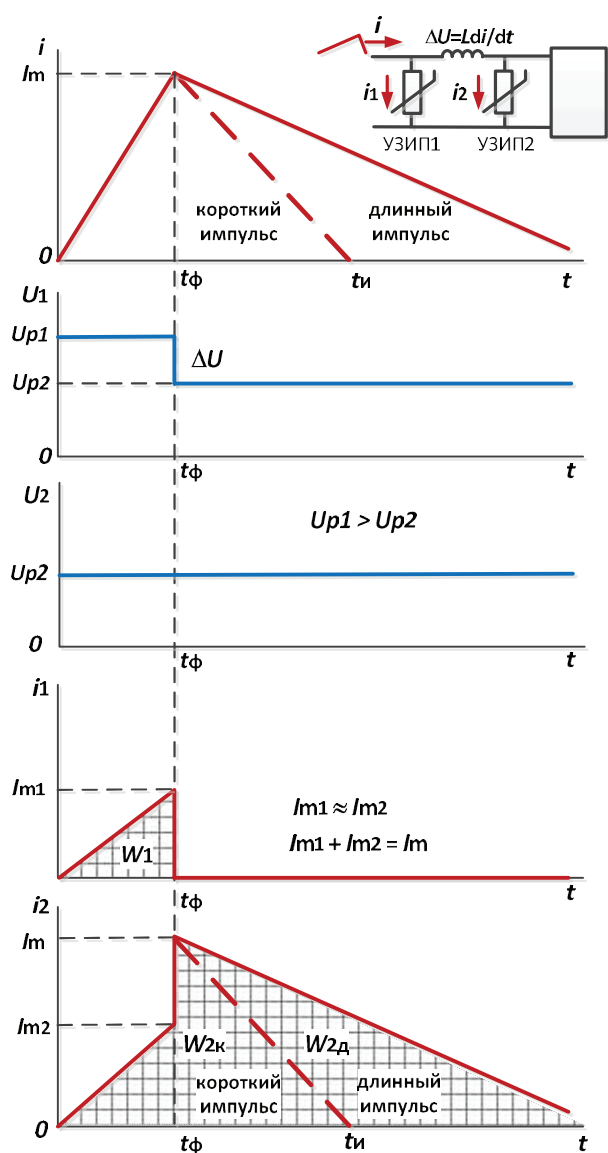
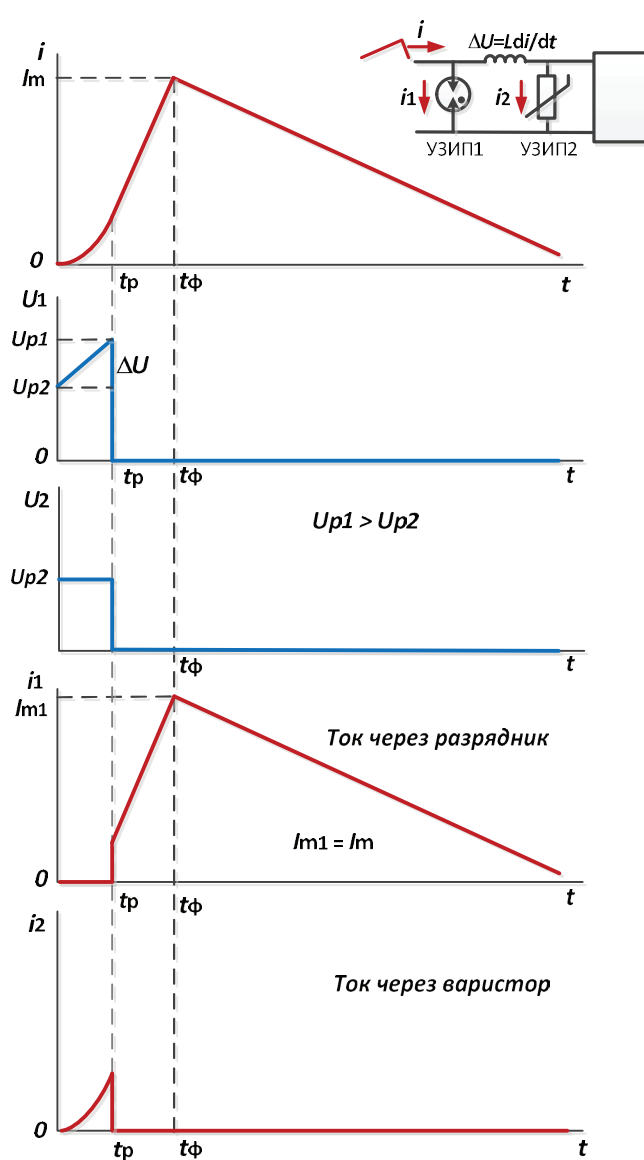


Рис. 3. Стандартизованные формы волны тока молнии 10/350 и 8/20 мкс для испытаний УЗИП

¹ Принято, что уровень ограничения УЗИП – то же, что уровень защиты, остающееся напряжение, напряжение срабатывания УЗИП.



а. Оба УЗИП на базе варисторов



б. УЗИП с разрядником и УЗИП с варистором

Рис. 4. Условное распределение токов и напряжений при координации двух УЗИП:

i – исходный импульс тока (короткий или длинный); I_m – амплитуда импульса тока;

U_{p1} и U_{p2} – остающееся напряжение на УЗИП1 и УЗИП2; ΔU – падение напряжения на индуктивности между УЗИП; W_1 и W_2 – энергия, поглощенная УЗИП1 и УЗИП2; к – короткий импульс; д – длинный импульс; t_ϕ , t_κ – длительность фронта и полного импульса волны тока; t_p – время срабатывания разрядника УЗИП1

▶ форма волны тока – треугольная;

▶ на фронте (и на спаде) скорость изменения тока di/dt принимается постоянной;

▶ напряжение на индуктивности нарастает мгновенно, и УЗИП1 срабатывает в момент возникновения импульса (по факту – с небольшой задержкой);

▶ напряжение на УЗИП не меняется во времени на стадиях нарастания и спада тока.

С момента времени $t = 0$ возникновения импульса и до окончания нарастания тока $t = t_\phi$ ($di/dt > 0$) на

индуктивном сопротивлении между УЗИП приложено напряжение ΔU , которое способствует срабатыванию УЗИП1, увеличивая напряжение на его выводах до его уровня ограничения U_1 .

В этот период времени ток i делится на две части обратно пропорционально сопротивлениям УЗИП: i_1 протекает через УЗИП1, i_2 – через УЗИП2. Координация по первому условию выполняется.

Далее, в момент перехода тока через максимум $t = t_\phi$ ($di/dt = 0$) напряжение на индуктивности падает до нуля, напряжение на УЗИП1 мгновенно

снижается и УЗИП1 возвращается в непроводящее состояние. Через УЗИП2 протекает полный ток до окончания импульса $t = t_\kappa$. Координация по второму условию будет выполнена, если за общее время протекания тока через УЗИП2 не будет превышена его энергостойкость.

Вывод по совместной работе УЗИП на базе варисторов. Классический каскад, цель которого – последовательное снижение уровня напряжения на нагрузке, не имеет смысла выполнять с помощью УЗИП на базе варисторов. При разных уровнях защиты таких УЗИП энергетическая

Таблица 1. Пример координации двух УЗИП II класса
(ГОСТ Р 55630-2013, приложение Е, таблица Е.5)

Первое УЗИП, испытанное по II классу			Второе УЗИП, испытанное по II классу			Минимальное расстояние между УЗИП м
U_p кВ	I_n кА	I_{max} кА	U_p кВ	I_n кА	I_{max} кА	
2,5	40	20	10	5	1,8	10
					1,5	15
					1,2	20
					1,0	25
	20	10	4	2	1,8	10
					1,2	15
2,0	40	20	10	5	1,2	20
					1,0	25
	20	10	4	2	1,8	10
					1,2	15
1,8	40	20	10	5	1,0	10
					1,2	15
	20	10	4	2	1,8	10
					1,2	15

разгрузка более слабого элемента УЗИП2 возможна только кратковременно на фронте импульса, а далее, на спаде, варистор УЗИП1 «закроется» и до окончания импульса весь ток будет протекать через УЗИП2. Параллельная работа варисторов имеет смысл только для снижения токовой нагрузки на каждый из них, при этом такая работа будет эффективной, если уровень защиты всех варисторов будет одинаковым.

Рассмотрим координацию разрядника и варистора (рис. 4б).

После срабатывания УЗИП2 ток через него и напряжение на индуктивном сопротивлении нарастают до момента $t = t_p$ срабатывания разрядника УЗИП1. После пробоя разрядника сопротивление его воздушного промежутка и падение напряжения на нем стремятся к нулю, поэтому весь ток потечет через УЗИП1 до момента окончания импульса. Координация достигнута, поскольку коммутируемая через разрядник энергия достаточно велика.

Крутизна фронта импульса тока имеет определяющее значение для величины падения напряжения на индуктивности. Чем круче фронт, тем выше di/dt и тем большее напряжение нарастет на индуктивности. Если фронт пологий и за время t_ϕ суммарное напряжение, приложенное к УЗИП1, не достигнет уровня его срабатывания, то весь ток протечет через УЗИП2 и оно может быть перегружено.

Координации легче достигнуть с крутым фронтом волны.

Расстояние между УЗИП имеет существенное значение для координации, если в качестве индуктивности используется провод. Один метр провода имеет индуктивность примерно 1 мкГн, а скорость нарастания тока молнии обычно превосходит 0,25 кА/мкс. Соответственно, падение индуктивного напряжения на проводе $L di/dt$ составит не менее 0,25 кВ/м. Чтобы УЗИП первой ступени гарантированно сработало, принимаем, что уровень дополнительно приложенного к нему напряжения должен составить 2,5 кВ — для этого необходимо минимум 10 м провода. Таким образом, расстояние между УЗИП разных классов должно составлять не менее 10 м (если больше, то не хуже).

На практике используется рекомендация соблюдать расстояние не

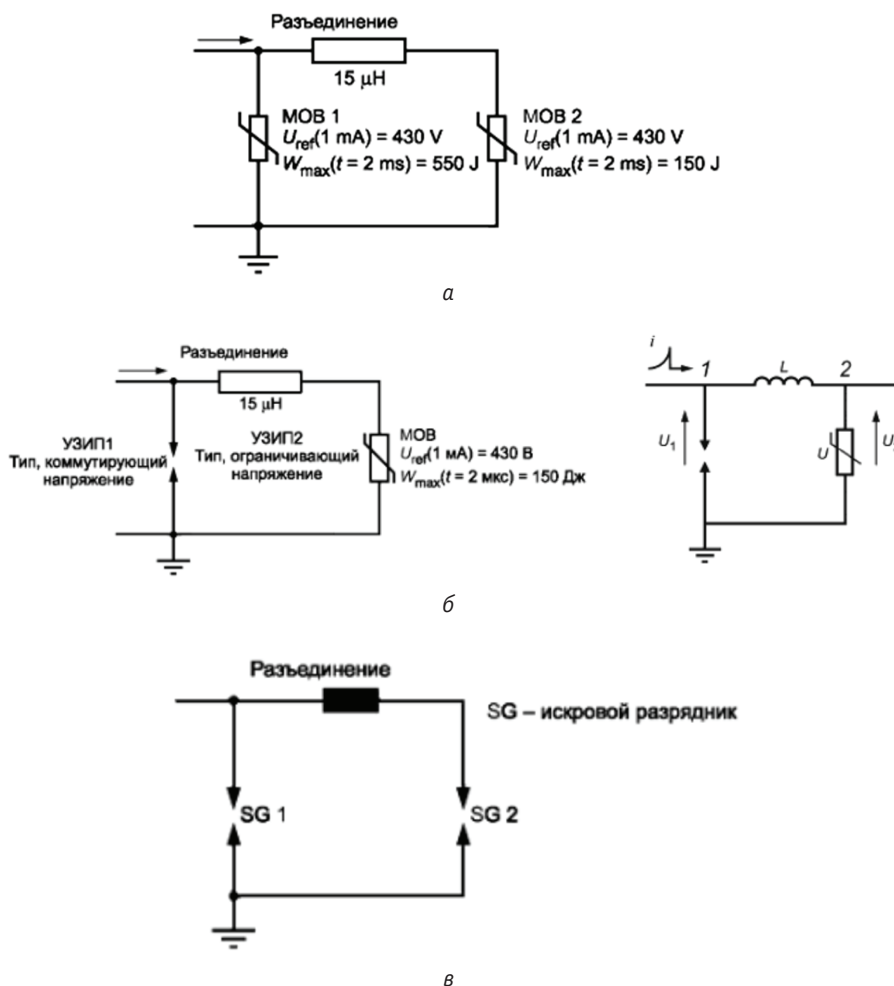


Рис. 5. Координация УЗИП на основе:
а – варисторов; б – разрядника и варистора; в – двух разрядников

менее 10 м между двумя УЗИП. Так, в ГОСТ Р 55630-2013 в приложении Е приведена таблица с минимальными расстояниями между двумя УЗИП II класса, обеспечивающими координацию (табл. 1).

На рис. 5 показаны схемы координации УЗИП ограничивающего и коммутирующего типов из ГОСТ 61643-12. Принципы координации не меняются в зависимости от типа рабочих элементов УЗИП. Однако в случае с разрядником и варистором координацию можно считать уже достигнутой, если удалось добиться первого условия – срабатывания УЗИП на базе разрядника.

УЗИП III класса и защищаемое оборудование

Защитное расстояние УЗИП класса III выделяется в отдельный случай, поскольку речь идет о низком напряжении защиты УЗИП и низкой импульсной стойкости оборудования, для которого каждые 10 В могут оказаться критичными.

УЗИП III класса должно быть установлено как можно ближе к защищаемому оборудованию. Если это расстояние является слишком большим, то при неблагоприятных условиях напряжение на зажимах оборудования может быть в два раза выше, чем остаточное напряжение УЗИП (уровень защиты). Это превышение является следствием двух механизмов, в каждом из которых играет роль длина проводников между УЗИП и оконечным оборудованием:

- ▶ рассматриваем контур «УЗИП – оборудование» (рис. 6). УЗИП срабатывает, через его цепь протекает ток. Магнитное поле этого тока наводит дополнительное напряжение в контуре на защищенной стороне цепи, которое складывается с напряжением на зажимах УЗИП. Это индуктированное напряжение зависит от площади контура, образованного подводящими проводниками оборудования. При увеличении размеров контура увеличивается наведенное U ;

- ▶ рассматриваем контур «УЗИП – оборудование», где оборудование заменяем нагрузкой, имеющей активное R и емкостное C сопротивление. Вместе с индуктивностью L подводящих проводников имеем RLC-контур и источник импульса (УЗИП) (рис. 7). Условно, если $L \sim 0$, то есть

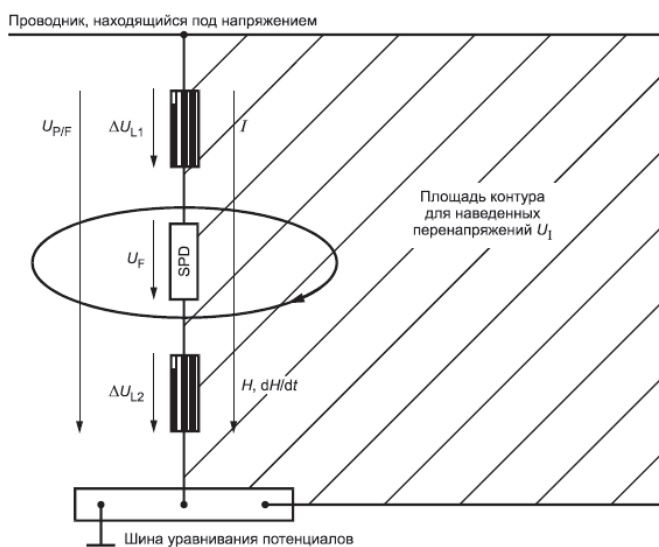


Рис. 6. Иллюстрация из ГОСТ Р МЭК 62305-4-2016 показывает возникновение индуктированного напряжения в контуре, образованном проводником, шиной заземления и оборудованием, при протекании тока через ветвь с УЗИП: I – частичный ток молнии; U_I – наведенное перенапряжение; $U_{P/F} = U_F + \Delta U$ – перенапряжение между проводником, находящимся под напряжением, и шиной уравнивания потенциалов; U_F – ограничивающее напряжение устройства защиты SPD; $\Delta U = \Delta U_{L1} + \Delta U_{L2}$ – индуктивное падение напряжения в проводниках уравнивания потенциалов; $H, dH/dt$ – магнитное поле и его производная по времени

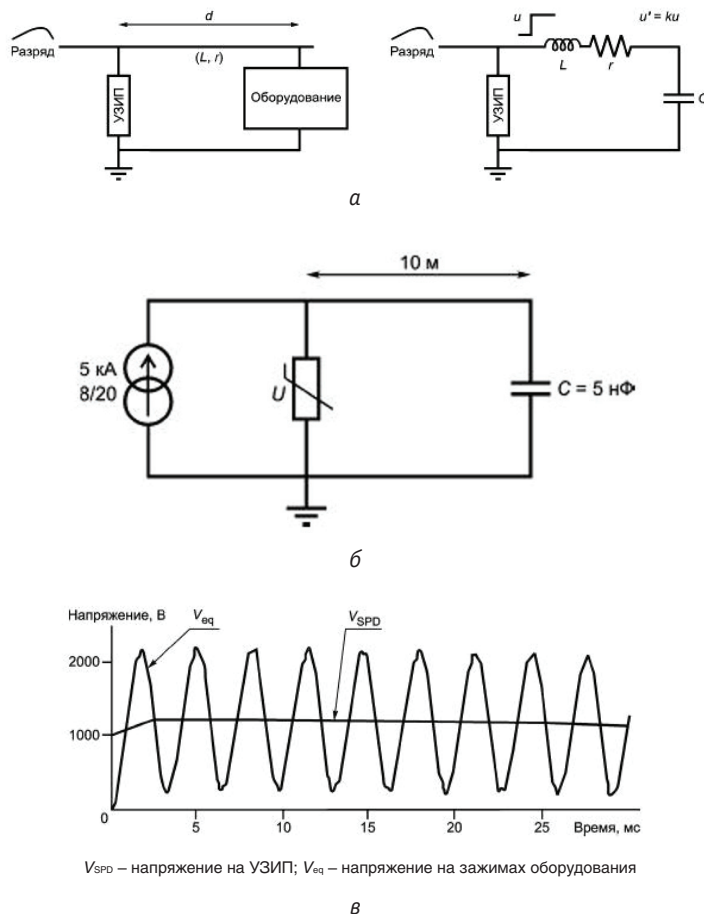


Рис. 7. Иллюстрации из ГОСТ Р МЭК 61643-12-2011 к вопросу о возникновении колебаний в контуре с нагрузкой: а – физическая и электрическая схемы системы, в которой защищаемое оборудование отделено от УЗИП, осуществляющего защиту; б – возможное колебание между цинковым варистором УЗИП и защищаемым оборудованием; в – пример удвоения напряжения

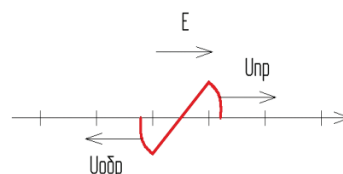


Рис. 8. К определению защитной зоны УЗИП

нет проводников, то активное сопротивление превосходит волновое, колебательные процессы в контуре отсутствуют, напряжение на зажимах оборудования равно напряжению источника (то есть уровню защиты УЗИП). Если L отлична от нуля, то есть появляется проводник между УЗИП и нагрузкой, то в контуре возникают колебания, которые в пределе могут привести к удвоению напряжения на зажимах оборудования. Чем длиннее проводник, тем больше амплитуда у этих колебаний.

В целом допустимое расстояние от УЗИП III класса зависит от типа УЗИП, крутизны и формы волны приходящего импульса перенапряжения и подключенной нагрузки. Пять метров — условная величина, принятая, исходя из теоретических оценок и опыта применения.

УЗИП I или II класса и защищаемое оборудование

Для анализа эффективности защитного действия УЗИП I класса рассматривается схема взаиморасположения УЗИП и защищаемого оборудования, ориентированная по отношению к источнику волны перенапряжения (ПН), распространяемой по кабельной линии в соответствии с рис. 8.

Каждый источник ПН создает две волны — прямую и обратную, распространяющиеся в противоположных направлениях вдоль КЛ.

В рассматриваемой схеме волна перенапряжения вначале воздействует на оборудование и, нарастая, распространяется до УЗИП. Появляется отраженная волна противоположного знака, которая распространяется обратно в сторону объекта. Отраженная волна суммируется с прямой волной, при этом результирующее напряжение и будет приложено к изоляции. Это напряжение может быть больше, чем остающееся на срабо-

тавшем УЗИП, вследствие того, что отраженная волна может проходить большое расстояние и затухать. Если отраженная волна дойдет до оборудования в момент времени, когда на него уже будет воздействовать исходное перенапряжение опасного уровня, то это будет означать отсутствие защитного действия УЗИП.

Расстояние между защищаемым оборудованием и УЗИП, при котором его применение становится бесполезным, можно оценивать, исходя из параметров волны воздействующего перенапряжения, в первую очередь ее фронта. Например, если считать длительность фронта волны перенапряжения равной 10 мкс, то расположение УЗИП на расстоянии, время двойного пробега которого окажется больше 10 мкс, будет бессмысленно.

Зная скорость нарастания перенапряжения и его допустимый для защищаемого оборудования уровень, можно определять требуемое ограничение по расстоянию от УЗИП до объекта защиты.

Например, мы знаем, что за 10 мкс перенапряжение достигнет 10 кВ, а допустимое для оборудования напряжение принято равным 4 кВ. Тогда для обеспечения успешной защиты время отклика от УЗИП должно быть не более 4 мкс (при условном допущении, что УЗИП ограничит перенапряжение на уровне, близком к нулю). Скорость волны в кабеле с ПВХ-изоляцией можно приблизительно считать равной 150 м/мкс (зависит от типа изоляции, конструкции, экрана). Поскольку за это время волна должна совершить двойной пробег, УЗИП должно располагаться не далее $4 \text{ мкс} : 2 \cdot 150 \text{ м/мкс} = 300 \text{ м}$. Учет процесса затухания волны при распространении по кабелю от точки установки УЗИП к защищаемому оборудованию будет корректировать данную оценку в сторону уменьшения расстояния.

Если принять длину фронта волны перенапряжения равной 2 мкс, а величину допустимого напряжения на оборудовании задать как четверть от амплитудного значения перенапряжения ($U_{\text{доп}} = \frac{1}{4} U_{\text{ампл}}$), то, соответственно, точно так же можно определить предельно допустимую длину кабеля. К моменту времени, когда напряжение на объекте защиты повысится до допустимого уровня, $T = 2 \text{ мкс} : 4 = 0,5 \text{ мкс}$, импульс должен добежать до УЗИП и вернуться к оборудованию. Предельная длина кабеля в данном случае составит $0,5 \text{ мкс} : 2 \cdot 150 \text{ м/мкс} = 37,5 \text{ м}$.

Следует учитывать, что при распространении волн по сети происходят отражения не только от УЗИП, но и от концов КЛ. Источник перенапряжения ПН может находиться и не в конце КЛ. Если ПН носит индуктированный характер, то оно распределено по КЛ.

Для правильного выбора мест установки УЗИП необходимо понимание и учет всей совокупности факторов, определяющих причины и условия возникновения опасных перенапряжений, а также их распространения по существующей проводящей сети от источника ПН до защищаемого оборудования и УЗИП. Изоляция КЛ также требует защиты, при значительных длинах кабелей — преимущественно с обеих сторон.

Обобщение теории и практики применения защитных устройств позволяет указать типичный диапазон зоны защиты УЗИП — до 30 м.

Н.Б. Кутузова, руководитель направления НЗУ,
А.Д. Сиваев, к. т. н.,
советник генерального директора по науке и технике,
АО «НПО «Стример», г. Санкт-Петербург,
тел.: +7 (812) 327-0808,
e-mail: info@streamer.ru,
сайт: www.streamer.ru