ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 55630 — 2013/ IEC/TR 62066:2002

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫЕ И ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Общие положения

IEC/TR 62066:2002
Surge overvoltages and surge protection in low-voltage a.c. power systems — General basic information
(IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2014

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Московским институтом энергобезопасности и энергосбережения на основе собственного аутентичного перевода на русский язык международного документа, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 337 «Электрические установки зданий»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 сентября 2013 г. № 982-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному документу IEC/TR 62066:2002 «Перенапряжения и защита от выбросов напряжения в низковольтных системах переменного тока. Общая основная информация» (IEC/TR 62066:2002 «Surge overvoltages and surge protection in low-voltage a.c. power systems — General basic information»).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного документа для приведения его в соответствие с вновь принятым наименованием серии стандартов МЭК 60364.

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты Российской Федерации и межгосударственный стандарт, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (gost.ru)

© Стандартинформ, 2014

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . 1
3 Термины и определения . . . 2
4 Перенапряжения в низковольтных системах . . . 4
5 Грозовые перенапряжения . . . 4
5.1 Основные положения . . . 4
5.2 Грозовые импульсные перенапряжения . . . 9
5.3 Передача грозовых импульсных перенапряжений со стороны системы среднего уровня напряжения . . . 11
5.4 Импульсные перенапряжения, вызванные прямым ударом молнии в низковольтную линию . . . 13
5.5 Грозовые импульсные перенапряжения, индуцированные в низковольтную линию . . . 13
5.6 Примеры индуцированных перенапряжений . . . 15
5.7 Перенапряжения, при ударе молнии в здание или в непосредственной близости . . . 16
5.8 Выводы относительно грозовых перенапряжений . . . 19
6 Коммутационные перенапряжения . . . 20
6.1 Основные положения . . . 20
6.2 Срабатывание выключателей и переключателей . . . 23
6.3 Срабатывание предохранителей . . . 25
6.4 Частота возникновения . . . 26
6.5 Взаимодействия с устройствами защиты от перенапряжений . . . 26
6.6 Выводы относительно коммутационных перенапряжений . . . 26
7 Временные перенапряжения . . . 27
7.1 Основные положения . . . 27
7.2 Величина временных перенапряжений при повреждениях в линиях среднего и низкого напряжения . . . 28
7.3 Временные перенапряжения из-за повреждений в низковольтных электрических установках . . . 29
7.4 Вероятность возникновения и оценка ущерба . . . 30
7.5 Выводы относительно временных перенапряжений . . . 32
8 Системные перенапряжения . . . 32
8.1 Основные положения . . . 32
8.2 Взаимодействие между системой электроснабжения и коммуникационной системой . . . 32
8.3 Другие взаимодействия . . . 33
8.4 Выводы относительно системных взаимодействий . . . 33
9 Импульсные перенапряжения и интенсивность отказов . . . 34
9.1 Основные положения . . . 34
9.2 Использование статистических данных о повреждениях . . . 34
10 Рассмотрение системы простой/оборудование повреждение/возгорание . . . 35
10.1 Основные положения . . . 35
10.2 Воздействие помех на работу системы . . . 35
10.3 Предотвращение непоправимого ущерба . . . 35
10.4 Ущерб, связанный с прерыванием питания и повреждениями . . . 36
11 Использование защиты от импульсных перенапряжений . . . 37
11.1 Основные положения . . . 37
11.2 Построение системы электроснабжения . . . 38
11.3 Типы электроустановок . . . 38
11.4 Возникновение импульсных перенапряжений . . . 39
11.5 РазъединительУЗИП . . . 39
11.6 Оценка степени риска . . . 39
11.7 Выводы о необходимости защиты от перенапряжений . . . 41
12 Применение защиты от импульсных перенапряжений . . . 41
12.1 Основные положения . . . 41
12.2 Защитные устройства от импульсных перенапряжений в системах электроснабжения . . . 42
12.3 Основные характеристики системы для выбора УЗИП . . . 43

12.4 Соображения по установке УЗИП 46
12.5 Координация между УЗИП и защищаемым оборудованием 48
12.6 Выводы по применению защиты от импульсных перенапряжений 50
Приложение А (справочное) Дополнительная информация о грозовых перенапряжениях 51
Приложение В (справочное) Коммутационные перенапряжения 60
Приложение С (справочное) Дополнительная информация о временных перенапряжениях 73
Приложение D (справочное) Дополнительная информация о системных перенапряжениях 76
Приложение Е (справочное) Дополнительная информация о применении УЗИП 81
Приложение F (справочное) Снижение перенапряжений за счет качественного заземления и оптимальной прокладки кабелей 98
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов ссылочным национальным стандартам Российской Федерации и действующему в этом качестве межгосударственному стандарту 101
Библиография 102

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫЕ И ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Общие положения

Surge overvoltages and surge protection in low-voltage a.c. power systems. General basic information

Дата введения — 2015—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт представляет общий обзор различных видов импульсных перенапряжений, которые могут произойти в низковольтных электроустановках, приводит типовые по величине и продолжительности импульсные перенапряжения, а так же частоту их возникновения.

Стандарт содержит информацию о перенапряжениях, связанных с взаимным влиянием между собой систем электроснабжения и коммуникационными системами, приводит общие руководящие указания по выбору средств защиты от перенапряжений и построению системы электроснабжения с учетом обеспечения ее экономичности и надежности, включая вопросы взаимодействия и координации защитных устройств при временных перенапряжениях.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие документы.

МЭК 60364-4-44:2007 Электрические установки низкого напряжения. Часть 4-44. Защита для обеспечения безопасности. Защита от резких отклонений напряжения и электромагнитных возмущений

IEC 60364-4-44:2007 Low-voltage electrical installations — Part 4-44: Protection for safety — Protection against voltage disturbances and electromagnetic disturbances

МЭК 60664-1:2007 Координация изоляции для оборудования в низковольтных системах. Часть 1. Принципы, требования и испытания

IEC 60664-1:2007 Insulation coordination for equipment within low-voltage systems — Part 1: Principles, requirements and tests

МЭК 61000-2-5:1995 *Электромагнитная совместимость (EMC) — Часть 2: Окружающая среда — Раздел 5: Классификация электромагнитных сред.* Основная публикация EMC

IEC 61000-2-5:1995 Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electromagnetic environment. Classification of electromagnetic disturbances for different locations of technical equipment

МЭК 61000-4-1:2006 Электромагнитная совместимость. Часть 4-1. Методики испытаний и измерений. Общий обзор серии стандартов

IEC 61000-4-1:2006 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-1: Testing and measurement techniques — Overview of IEC 61000-4 series

МЭК 61000-4-4:2004 Электромагнитная совместимость. Часть 4-4. Методы испытаний и измерений. Испытание на невосприимчивость к быстрым переходным процессам и всплескам

IEC 61000-4-4:2004 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-4: Testing and measurement techniques — Electrical fast transient/burst immunity test

МЭК 61000-4-5:2005 Электромагнитная совместимость. Часть 4: Методики испытаний и измерений. Раздел 5: Испытание на невосприимчивость к выбросу напряжения.

Издание официальное

IEC 61000-4-5:2005 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-5: Testing and measurement techniques — Surge immunity test

МЭК 62305-1:2010 Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы

IEC 62305-1:2010 Protection against lightning — Part 1: General

МЭК 62305-2(2010) Защита от молнии. Часть 2. Управление риском

IEC Protection against lightning — Part 2: Risk management

МЭК 62305-3:2010 Защита от молнии. Часть 3. Физические повреждения конструкций и опасность для жизни

IEC 62305-3:2010 Protection against lightning — Part 3: Physical damage to structures and life hazard

МЭК 62305-4:2010 Защита от молнии. Часть 4. Электрические и электронные системы внутри конструкций

IEC 62305-4:2010 Protection against lightning — Part 4: Electrical and electronic systems within structures

МЭК 61643-11:2011 Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 11. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к низковольтным системам распределения электроэнергии. Требования и методы испытаний

IEC 61643-11:2011 Low-voltage surge protective devices — Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems — Requirements and test methods

МЭК 61643-12:2008 Устройства защиты от перенапряжений низковольтные. Часть 12. Устройства защиты от перенапряжений, подсоединенные к низковольтным системам распределения электроэнергии. Принципы выбора и применения

IEC 61643-12:2008 Low-voltage surge protective devices — Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems — Selection and application principlesМЭК

ITU-T K 20, Стойкость телекоммуникационного оборудования, установленного в телекоммуникационных центрах к перенапряжениям и сверхтокам

ITU-T K 20 Resistibility of telecommunication equipment installed in a telecommunications centre to overvoltages and overcurrents

ITU-T K 21, Стойкость телекоммуникационного оборудования, установленного в помещении клиентов к перенапряжениям и сверхтокам

ITU-T K 21 Resistibility of telecommunication equipment installed in customer premises to overvoltages and overcurrents

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **комбинированная волна:** Волна, вырабатываемая генератором, который дает 1,2/50 импульс напряжения при разомкнутой цепи и 8/20 импульс тока для короткозамкнутой цепи. Напряжение, амплитуда тока и формы волны, которая передается на УЗИП, определяются генератором и импедансом УЗИП, к которому прикладывается импульс. Отношение максимального напряжения для разомкнутой цепи к максимуму тока короткозамкнутой цепи составляет 2 Ома и определяется как фиктивный импеданс Z_f. Ток короткого замыкания обозначается как I_{sc}. Напряжение разомкнутой цепи обозначается как U_{oc}

Примечание — Комбинированная волна, вырабатываемая генератором импульсов в соответствие с определением п.3.24 МЭК 61643-1, может быть применима и к другому оборудованию помимо УЗИП.

3.2 **объединенное многопортовое УЗИП:** Интегрированное устройство импульсной защиты в одном блоке для обеспечения импульсной защиты двух или более портов оборудования, соединенного с различными системами, такими как система питания и коммуникационная система

Примечание — В дополнение к обеспечению защиты от перенапряжения для каждого порта, устройство может также обеспечить уравнивание потенциалов между портами оборудования.

3.3 **координация УЗИП (последовательное соединение):** Выбор характеристик для двух или более УЗИП, которые будут присоединены к одним и тем же проводникам системы, но разделенные некоторым разъединяющимся импедансом так, что параметры данного импеданса и поступающего импульса гарантируют, что при таком выборе энергия, рассеиваемая в каждом из УЗИП, соответствует его параметрам

3.4 **прямой удар молнии:** Удар, воздействующий непосредственно на рассматриваемую конструкцию

3.5 **уравнивание потенциалов:** Электрическое соединение проводящих частей, предназначенных для достижения эквипотенциальности

Примечание — В обычных электроустановках уравнивание потенциалов обеспечивает безопасность на промышленной частоте. При скачке тока по длине проводников уравнивания потенциалов неизбежно возникает некоторая разность потенциалов.

3.6 **доступный объект:** Физический объект (например, больница, фабрика, машина, и т. д.), который построен, сконструирован, смонтирован или установлен для выполнения некоторой определенной функции или служащий или способствующий выполнению некоторых конкретных целей

3.7 **удар молнии в землю:** Разряд атмосферного электричества между облаком и землей, состоящий из одного или более раздельных искровых разрядов

Примечание — Удар молнии в землю может быть понят не только как удар именно в землю (почву), но также как удар в конструкцию, систему электроснабжения, и т. д., в противоположность разряду от облака к облаку.

3.8 **система молниезащиты (СМЗ):** Полная система для защиты пространства от воздействия молнии. Она включает внешние и внутренние системы молниезащиты

Примечание — В некоторых случаях система молниезащиты может состоять только из внешней или внутренней СМЗ.

3.9 **удар в непосредственной близости:** Удар молнии вблизи рассматриваемой конструкции

3.10 **точка удара:** Точка, где удар молнии попадает в землю, конструкцию или в систему молниезащиты

3.11 **ожидаемое перенапряжение:** Теоретическое перенапряжение, которое появилось бы на проводниках системы электроснабжения или пользователя установки до пробоя основной изоляции или срабатывания устройств, ограничивающих перенапряжение

3.12 **разъединитель УЗИП:** Внутреннее или внешнее устройство предназначенное для разъединения УЗИП и системы электроснабжения в случае повреждения УЗИП. Оно предназначается для того, чтобы предотвратить длительное повреждение системы и может обеспечить визуальную индикацию повреждения УЗИП

3.13 **крутизна:** Отношение наклона передней стороны волны импульса, для интервала между 10 % и 90 % амплитудного значения, к наклону, определенному для интервала между 10 % и 30 % амплитудного значения

3.14 **разряд (молнии)**: Единичный электрический разряд молнии, ударяющей в землю

3.15 **импульсное перенапряжение:** Кратковременное или переходное напряжение, возникающее в системе, от импульса тока, возникающего из-за атмосферного разряда, индукции, коммутации или непосредственного повреждения в системе

3.16 **устройство защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП):** Устройство, которое предназначено для ограничения переходного перенапряжения и отведения импульса тока. Устройство содержит не менее одного нелинейного компонента

3.17 **эквалайзер:** Устройство, используемое для присоединения оборудования к внешним системам таким образом, чтобы все проводники, подключаемые к защищаемой нагрузке, присоединялись физически и электрически через общую оболочку с общей точкой портов ввода и вывода каждой системы

Примечание — Совместное использование общей точки может быть выполнено в пределах устройства или путем непосредственного соединения или через некоторое устройство, такое как УЗИП, которое обеспечивает отделение в нормальных условиях, но обеспечивает эффективное соединение во время возникновения импульса в одной или обеих системах.

3.18 **временное перенапряжение (ВПН):** Относительно длительное перенапряжение промышленной частоты в данной установке, которое является незатухающим или слабо затухающим

Примечание — Временные перенапряжения обычно происходят из-за коммутационных операций или повреждений (например, внезапное изменение нагрузки, однофазные замыкания) и/или из-за нелинейности (феррорезонансные явления, гармоники).

3.19 **тепловой пробой:** Эксплуатационное условие, когда длительные потери мощности в УЗИП превышают допустимое тепловое рассеяние корпуса и соединений, приводя к увеличению температуры внутренних элементов и, в результате, к повреждению.

4 Перенапряжения в низковольтных системах

Перенапряжения в низковольтных системах возникают из-за нескольких типов событий или механизмов взаимодействия и могут быть классифицированы по четырем типам. В настоящем стандарте основное внимание уделено первым двум типам перенапряжений и приведены основные указания для третьего типа. Четвертый тип перенапряжений возникает при взаимодействии системы электроснабжения переменного тока с другими системами, такими как коммуникационные системы.

a) Грозовые перенапряжения.

Грозовые перенапряжения являются результатом прямого удара молнии или удара молнии в непосредственной близости от системы электроснабжения, в здания с системой молниезащиты или без нее или в землю. Удаленный удар молнии также может вызвать перенапряжения в цепях электроустановки. Эти перенапряжения рассмотрены в разделе 5 настоящего стандарта.

b) Коммутационные перенапряжения.

Коммутационные перенапряжения являются результатом намеренных действий в системе электроснабжения, таких как подключение индуктивной или емкостной нагрузки, переключение в системе передачи или в системе распределения электроэнергии или в низковольтной системе в результате операций конечного потребителя. Такие перенапряжения могут также быть результатом неумышленных событий, таких как нарушения в системе электроснабжения и их устранение. Эти перенапряжения рассмотрены в разделе 6 настоящего стандарта.

c) Временные перенапряжения.

Временные перенапряжения происходят в системах электроснабжению, как результат широкого диапазона условий функционирования системы как в условиях нормального функционирования, так и в результате аварий. Обе причины рассмотрены в разделе 7. Их наличие относится к выбору соответствующих УЗИП.

d) Системные перенапряжения взаимодействия.

Перенапряжения могут возникать между различными системами, такими как электроснабжение и связь, во время скачков тока в одной из систем. Они кратко рассмотрены в разделе 8 настоящего стандарта.

5 Грозовые перенапряжения

5.1 Основные положения

Молния — естественное и неизбежное событие, которое влияет на низковольтные системы (системы электроснабжения, системы связи) посредством нескольких механизмов взаимодействия. Очевидное взаимодействие — это удар молнии в систему электроснабжения, но и другие механизмы взаимодействия могут также вызвать перенапряжения (см. рисунок 1). Для лучшего представления разнообразия возможных механизмов взаимодействия в настоящем стандарте приведена сводка основных параметров удара молнии между облаком и объектом на уровне земли. На рисунке 2 приведены примеры воздействия удара молнии на типовую сложную электрическую систему.

К существенным параметрам молнии относятся: форма волны, амплитуда и частота возникновения перенапряжения. Понятие близкого и удаленного удара молнии включает несколько параметров и связанных с ними воздействий, как это показано в таблице 1.

Рассматриваются три типа механизмов взаимодействия, которые могут привести к перенапряжениям в низковольтных системах, полученные как в результате измерений, так и полученные путем вычислений. При рассмотрении вопросов перенапряжения важным аспектом рассмотрения является электрический ток сам по себе или как источник перенапряжения. В случае прямого удара молнии в электрическую систему непосредственный эффект возникает от тока молнии, который вызывает перенапряжение на импедансе заземления. Эффективное значение импеданса для тока разряда молнии составляет несколько тысяч Ом. Соответственно, ток молнии может фактически быть рассмотрен, как идеальный источник тока.

В случае удара молнии в непосредственной близости от объекта эффект перенапряжения вызывает наличие замкнутых контуров в цепях или резистивных связях, возникающих из-за импульсов тока.

В случае удаленного удара молнии скачки перенапряжений ограничиваются наведенными (индуцированными) напряжениями. Реакция электрической системы при ударе молнии является важным аспектом при оценке возникновения возможных импульсов токов и перенапряжений.

Для данного удара молнии уровень перенапряжения, появляющегося в установке конечного потребителя, зависит от характеристик линий связи, таких как расстояние и характеристики системы между точ-

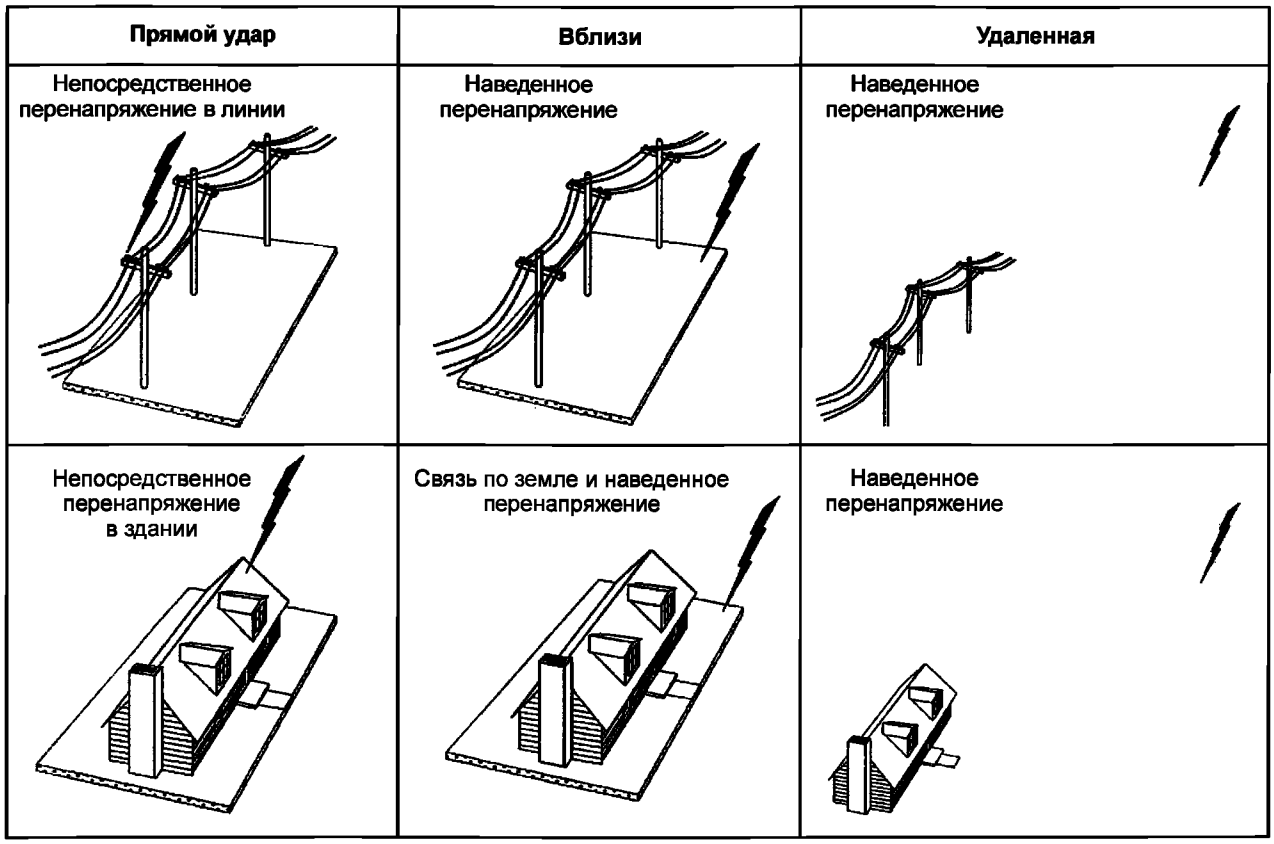
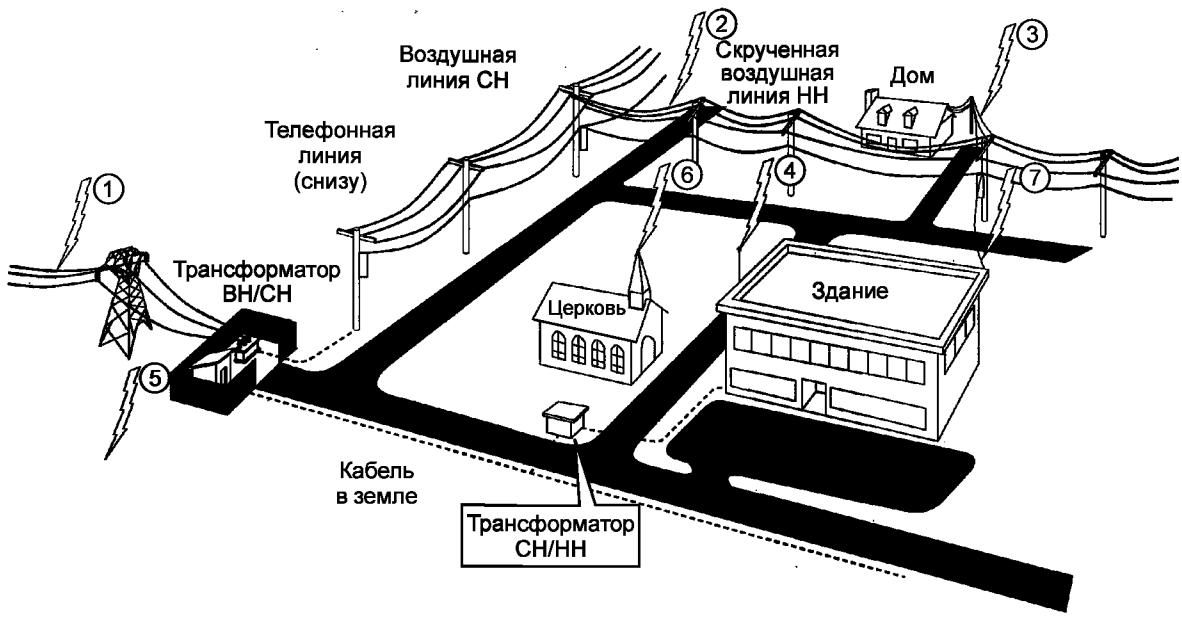


Рисунок 1 — Примеры механизмов воздействия при ударе молнии



1 Прямой удар в линию ВН
2 Прямой удар в линию СН
3 Прямой удар в линию НН
4 Прямой удар в систему молниезащиты
5 Удар в землю
6 Удар в соседние конструкции
7 Удар в телефонную линию

Рисунок 2 — Примеры удара молнии в сложной электрической системе

кой удара молнии и оборудованием конечного потребителя, способа заземления и импеданса заземления, наличие УЗИП вдоль линий и в распределительных устройствах. Все эти факторы изменяются в широком диапазоне в соответствии с конфигурацией сетей.

Таблица 1 — Характеристики и воздействия молнии

Характеристики	Прямой удар	Удар в близи	Удаленный удар
Механическое воздействие	Конструкция		
Тепловое воздействие	Конструкция и цепи		
Энергия	УЗИП на вводе (высокое напряжение)	УЗИП на вводе (среднее напряжение)	УЗИП на вводе (низкое напряжение)
Скорость нарастания тока	Смежные цепи	Близкорасположенные цепи	Большие замкнутые цепи
Повышение потенциала на заземлителе	Смежные цепи	Близкорасположенные цепи	
Индуктивная связь	Смежные цепи	Близкорасположенные цепи	Большие замкнутые цепи
Емкостная связь	Смежные цепи	Близкорасположенные цепи	
Резистивная связь	Присоединенные цепи	Близкорасположенные цепи	
Распространение вдоль проводной линии	УЗИП на вводе (высокое напряжение)	УЗИП на вводе (среднее напряжение)	УЗИП на вводе (низкое напряжение)

В настоящем стандарте рассмотрена первая стадия события при ударе молнии в отсутствие средств снижения воздействия (предполагаемых или имеющихся). Оценка первой стадии события ведет к пониманию ожидаемого перенапряжения. На следующем этапе рассматриваются имеющиеся факторы уменьшения воздействия чтобы получить информацию о том, какое предполагаемое перенапряжение может появиться в оборудовании конечного потребителя. Могут быть использованы различные механизмы уменьшения воздействия, включая естественное затухание, зависящее от конфигурации системы, и преднамеренное уменьшение путем установки различных УЗИП как со стороны питания, так и у конечного потребителя.

В стандарте кратко описываются основные параметры молнии, необходимые для рассмотрения трех типов механизмов воздействия, определенные выше, и оценивается вероятность различных механизмов воздействия.

Разряды молнии от облака к земле происходят в двух режимах, в зависимости от соответствующей полярности облака и земли.

Удар молнии при положительном потенциале земли состоит из следующих компонентов:

- положительный импульсный ток и, возможно,
- положительный ток продолжения.

Удар молнии при отрицательном потенциале земли состоит из следующих компонентов:

- отрицательный импульсный ток начального разряда, и, возможно,
- отрицательные импульсные токи последующих разрядов, и, возможно,
- отрицательный ток продолжения.

Объекты ограниченной высоты поражаются как при положительном, так и отрицательном потенциале земли. На рисунке 3 приведены взаимосвязанные возможные формы тока молнии.

Объекты значительной высоты, такие как башни высотой более 100 м, поражаются как при положительном, так и при отрицательном потенциале земли. В этом случае, разряд молнии может быть с током продолжения, но возможно возникновение только тока продолжения.

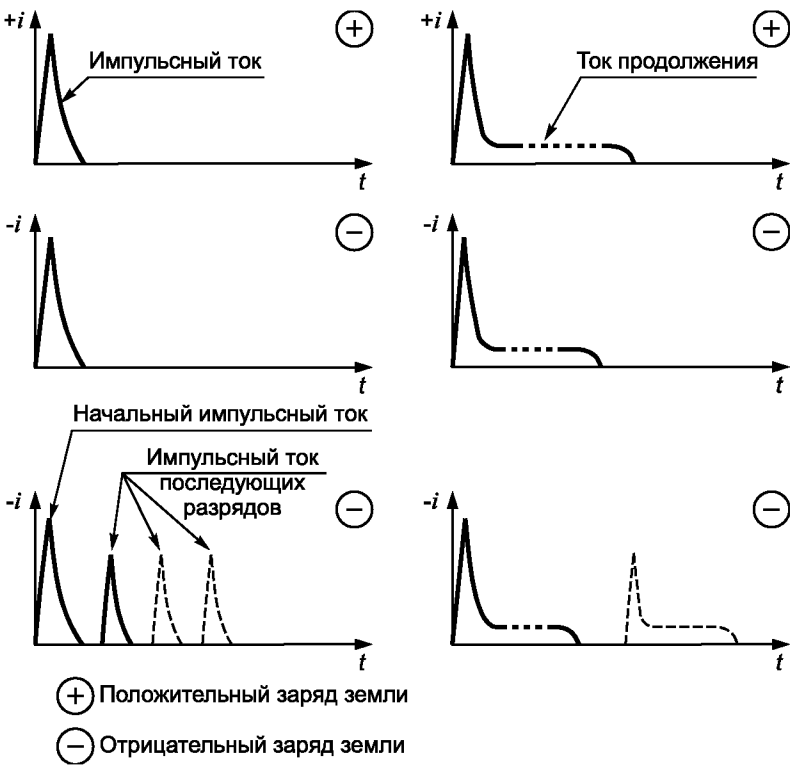
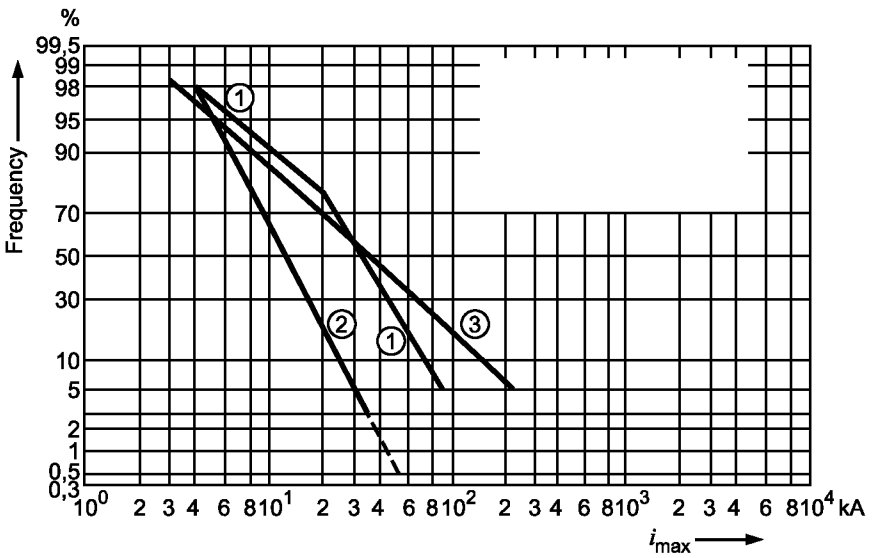


Рисунок 3 — Возможные формы волны тока молнии при ударе в наземные объекты



1 Отрицательные первые разряды
2 Отрицательные последующие разряды
3 Положительный заряд земли

Рисунок 4 — Частотное распределение импульсных токов для трех типов удара молнии

Таблица 2 — Статистические данные основных параметров при ударе молнии

Параметр молнии	Процентное соотношение	
	50 %	5 %
Максимальный ток (kA)		
Отрицательные первые импульсы	20	90
Отрицательные последующие импульсы	12	29
Положительно заряженная земля	35	250
Полный заряд (C)		
Отрицательный потенциал земли	8	40
Положительно заряженная земля	80	350
Переходный заряд (C)		
Отрицательные первые импульсы	5	20
Отрицательные последующие импульсы	1	4
Положительно заряженная земля	16	150
Энергия (килоджоуль / 2J)		
Отрицательные первые импульсы	55	550
Отрицательные последующие импульсы	6	52
Положительно заряженная земля	650	15 000
Максимальный наклон переходного тока (kA / | js)		
Отрицательные первые импульсы	24	65
Отрицательные последующие импульсы	40	162
Положительно заряженная земля	2	32

Примечание. Эти значения представляют характеристики тока обратного хода в основном канале (измерения были сделаны для минимального уровня).

Максимальное значение импульсного тока молнии — существенный параметр, который определяет падение напряжения на импедансе заземлителя или объекта и таким образом определяет разность потенциалов между объектом и его окружением. Заряды, передаваемые импульсным током и ток продолжения — существенные параметры, которые вызывают повреждение металлов разрядом молнии. Энергия — существенный параметр, который определяет нагрев проводников током молнии, так же как и механические воздействия от электромагнитных сил.

Уровень повышения — существенный параметр для напряжений, вызванных в замкнутых проводных цепях вблизи импульса тока и для последующих токов. Многоимпульсный разряд — основная причина нарушений работы цифровых систем, из-за повторения побочных сигналов для первого импульса и более резкого повышения тока при последующих импульсах.

Карта годовой интенсивности гроз приведена на рисунке 5. Для территорий, где действует система наблюдения за молниями, используется информация в соответствии с новыми картами плотности ударов молнии. Карты плотности ударов молнии обеспечивают более точную информацию, чем традиционные карты грозовых дней.

Примечание — Карты плотности ударов молнии постепенно заменят карты грозовых дней.

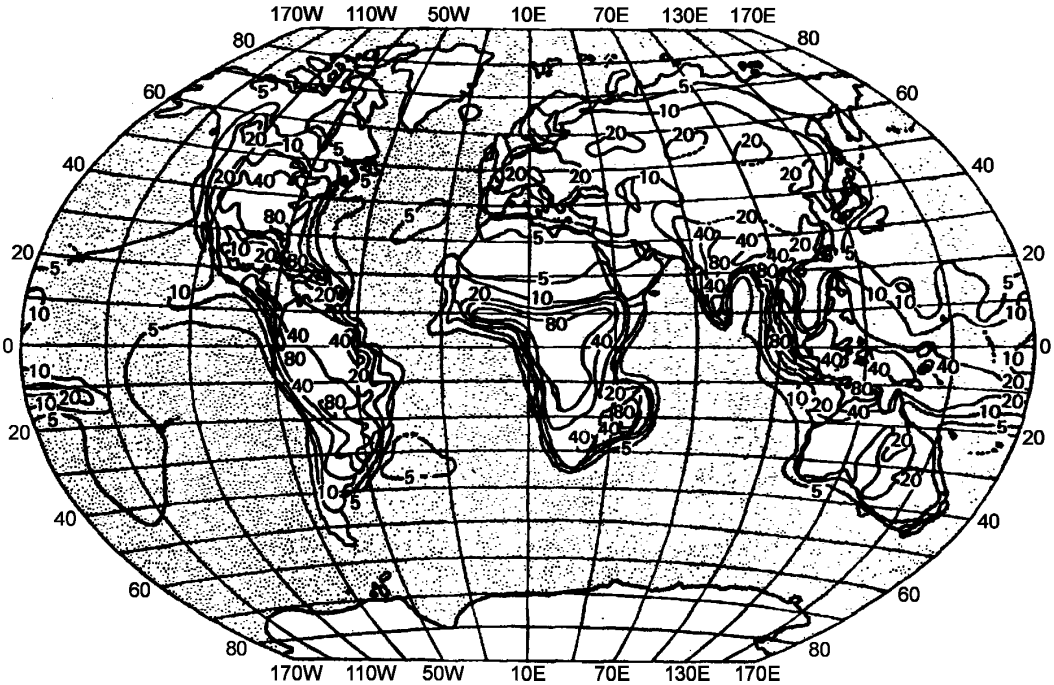


Рисунок 5 — Карта интенсивности гроз [1)]

5.2 Грозовые импульсные перенапряжения

Перенапряжения при ударе молнии в электрических системах могут быть классифицированы по их источнику следующим образом:

- перенапряжения из-за прямого удара молнии в электрические сети;
- перенапряжения в электрических сетях, вызванные ударом молнии в землю на некотором расстоянии;
- перенапряжения, вызванные в результате взаимодействием системы через резистивную, индуктивную и емкостную связь с током разряда молнии.

5.2.1 Прямой удар молнии в воздушную линию

Как отмечалось ранее эффективный импеданс канала молнии имеет высокое значение и ток молнии можно фактически рассматривать как идеальный источник тока. Возникающее перенапряжение определяются эффективным импедансом и пропорционально току молнии. При ударе молнии в проводник воздушной линии импеданс в первый момент определяется импедансом (импульсный импеданс) линии. Этот импеданс (Z_0) обычно находится в диапазоне 400 до 500 Ом для каждого провода. Как показано на рисунке 6, ток (I) первоначально делится на две части, по одной в каждом направлении.

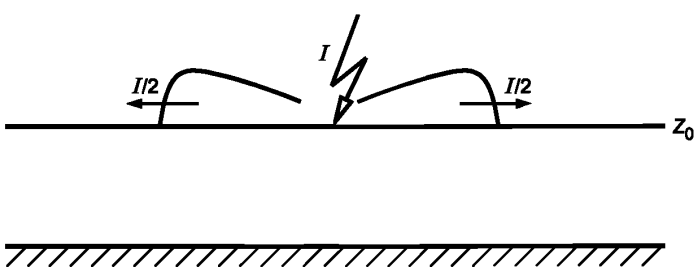


Рисунок 6 — Прямой удар молнии в воздушную линию

Импульс (U), сгенерированный током в точке удара определяется как (1)

$$U = Z_0 \times I/2, \quad (1)$$

где

U — импульс напряжения (кВ);

Z_0 — импульсный импеданс (Ом);

I — ток молнии (кА).

Для умеренного значения тока 20 кА и импеданса импульса 400 Ом предполагаемое напряжение импульсного перенапряжения в точке удара молнии составляет 4000 кВ. Таким образом для линий среднего напряжения (СН)[1] и для линий низкого напряжения (НН), искровой разряд будет возникать между всеми проводниками линии и, в большинстве случаев, также по отношению к заземлителям, расположенным вдоль линии. После искрового разряда эффективный импеданс уменьшается в зависимости от значения сопротивлений заземлителей. Однако для относительно низкого эффективного импеданса в 10 Ом напряжение на линии составит порядка 200 кВ для тока молнии 20 кА, принятого в этом примере, что может привести к возникновению искрового разряда.

Частота ударов молнии в линию зависит от локальной плотности грозовой активности и параметров линии (особенно ее высоты) и возможных эффектов экранирования. Для линий, расположенных на открытом пространстве, число ударов молнии в линию может быть определено как для полосы шириной в три высоты линии (H). Эффективная площадь (A) может быть определена:

$$A = 6 \times H \times L, \quad (2)$$

где

A — эффективная площадь;

H — высота;

L — длина линии.

Число ударов молнии в год (N) определяется умножением A на локальную плотность ударов молнии (N_g) следующим образом:

$$N = A \times N_g \times I \times 10^{-6}, \quad (3)$$

где

N — число ударов молнии в год;

A — эффективная площадь ($м^2$);

N_g — локальная плотность ударов молнии на $км^2$ ежегодно.

Для линии высотой 5 м и N_g, равной 1, N равняется 0,03 на км линии ежегодно, то есть, три удара на 100 км линии ежегодно.

5.2.2 Грозовые перенапряжения, индуцированные в линии

Из-за изменений электромагнитного поля, вызванных ударом молнии, индуцированные перенапряжения возникают в линиях всех видов, включая расположенные на значительном расстоянии от удара молнии. В первом приближении предполагаемые перенапряжения U (в киловольтах) между проводом линии и землей (самое близкое к точке удара) могут быть оценены по формуле (4):

$$U = 30 \times (H/d) \times I, \quad (4)$$

где

I — ток молнии (кА);

H — высота проводов от земли (м);

d — расстояние до точки удара молнии (м).

Значение перенапряжения одинаково для всех проводников, так как расстояние между фазными проводниками мало по сравнению с расстоянием до точки удара молнии.

Для линии высокого напряжения с высотой расположения проводов 10 м для тока молнии 30 кА индуцированное напряжение будет порядка 100 кВ для удара молнии на расстоянии 100 м.

Для линии НН с высотой 5 м ток 100 кА индуцирует напряжение 1,8 кВ даже на расстоянии 10 км.

---

[1] В данном стандарте трансформатор распределительной подстанции будет использоваться в качестве границы между низковольтной системой — до 1 000 В — и системой основного напряжения. Последнее, независимо от его значения, будет упоминаться как «напряжение среднего уровня», не зависимо от практики разделения между «напряжением среднего уровня» и «напряжением высокого уровня» системы.

5.2.3 Перенапряжения, вызванные влиянием других систем

Удар молнии в землю может привести к появлению наземного потенциала высокого значения в точке удара и вблизи нее. Это явление вызывает перенапряжения в электрических системах за счет заноса потенциала из этой точки на системы заземления.

На рисунке 7 приведен пример такого случая. Повышение потенциала системы заземления определяется током молнии и эффективным импедансом заземления. В начале потенциал заземлителя определяется локальным импедансом, который может быть равным 10 Ом. Это означает, что высокое напряжение, возникающее между системой заземления и электрической установкой в здании может привести к повреждению изоляции или срабатыванию УЗИП. Перенапряжения, возникшие в системе электропитания, передаются в другие системы (телекоммуникационные, информационные, сигнальные системы, и т.п.), а также могут передаваться на другие здания, конструкции и установки, например, на установки, получающие питания от одного и того же трансформатора при ударе молнии.

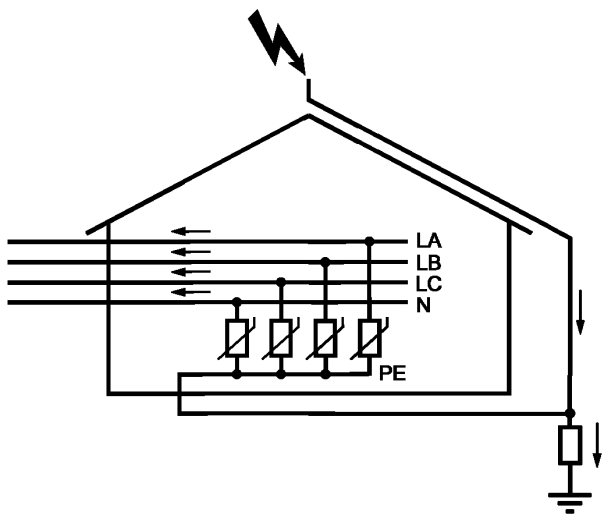


Рисунок 7 — Пример резистивной связи с системой молниезащиты

Из-за высоких значений электромагнитных полей, вызванных молнией, за счет индуктивной и емкостной связи с электрическими системами, вблизи пути тока молнии могут возникать опасные перенапряжения, особенно в электронных системах, системах передачи и обработки данных, вызывая отказы и/или неправильное функционирование.

5.3 Передача грозовых импульсных перенапряжений со стороны системы среднего уровня напряжения

Поскольку системы среднего уровня напряжения (СН) более протяженны и выше чем другие конструкции, расположенные в их близости, включая деревья, линии среднего напряжения более подвержены ударам молнии, чем линии низкого напряжения (НН). Число ударов молнии, оказывающих влияние на линию, зависит от грозовой интенсивности в данной области. Распространение импульса через систему СН и скорость передачи к системе НН зависит от конструкции системы.

Грозовые перенапряжения в системах СН вызываются прямыми ударами молнии или ударами молнии, произошедшими в непосредственной близости, как приведено в разделе 5.2. Кроме того, обратный искровой разряд может произойти от удара в заземленные провода или сторонние проводящие части конструкций или оборудования, или при нанесении удара молнии в землю вблизи от конструкций линии.

5.3.1 Значение импульсного перенапряжения и его распространение в системах СН

Распространение импульса зависит от конструкции системы СН и от установки защитных устройств от перенапряжения. Высокоуровневые грозовые импульсы быстро ослабляются во время их распространения по линии за счет потерь и искровых разрядов через изоляторы линии. Практически после нескольких пролетов линии значение перенапряжения уменьшается до допустимого уровня по напряжению изоляции линии.

За исключением случаев прямого удара в трансформатор СН/НН или в непосредственной близости в землю, можно предположить, что перенапряжения в системе СН ограничиваются классом изоляции изоляторов линии. В системе 20 кВ это приблизительно 150—180 кВ. Для линий в лесных массивах без заземленной арматуры могут произойти намного более высокие импульсные перенапряжения.

Второе ограничение уровня импульсных перенапряжений обеспечивается защитными устройствами от перенапряжения, которые обычно расположены на высокой стороне трансформатора СН/НН или на переходе в подземные линии. Эти защитные устройства могут быть импульсными разрядниками ZnO или SiC или искровыми разрядниками. Остаточное перенапряжение (например, в диапазоне 70 кВ для системы на 20 кВ), зависит от номинального значения и импеданса заземления защитных устройств. Если используются искровые разрядники, то можно сказать, что грозовое перенапряжение приводит к временному перенапряжению промышленной частоты.

В приложении А приведен пример измерений грозовых перенапряжений для типовой системы электроснабжения 20 кВ.

5.3.2 Передача импульсных перенапряжений в систему НН

Импульсные перенапряжения от удара молнии в системе СН передаются в систему электроснабжения НН двумя различными способами:

- емкостной и индуктивной связью через трансформатор СН/НН;
- связью по земле.

Значение импульсного перенапряжения зависит от многих параметров, таких как:

- система заземления НН (TT, TN, IT);
- характеристики и нагрузки линии НН;
- устройства защиты от перенапряжения НН;
- условия соединения СН и НН с заземлителями;
- типа трансформатора.

Анализ распространения грозового перенапряжения и его передачи в системы НН может быть выполнен с использованием высокочастотной модели. Такая модель представляет трансформатор преимущественно с емкостной связью, которая считается его самой важной характеристикой, когда рассматриваются частоты в диапазоне МГц (см. приложение А).

В случае прямого удара молнии в линию СН срабатывание разрядника или перекрытие изолятора отводит ток импульса на систему заземления, что может привести к резистивной связи по земле между системами СН и НН. Перенапряжение передается к системе НН в типовом случае, как приведено на рисунке 8а. В зависимости от значений импеданса заземления, это перенапряжение по наземной связи может быть намного выше, чем за счет емкостной связи через трансформатор. Проблема может быть решена разделением заземлителей как приведен на рисунке 8b. Однако при этой конфигурации будет возникать перенапряжение между трансформатором и его вторичной обмоткой.

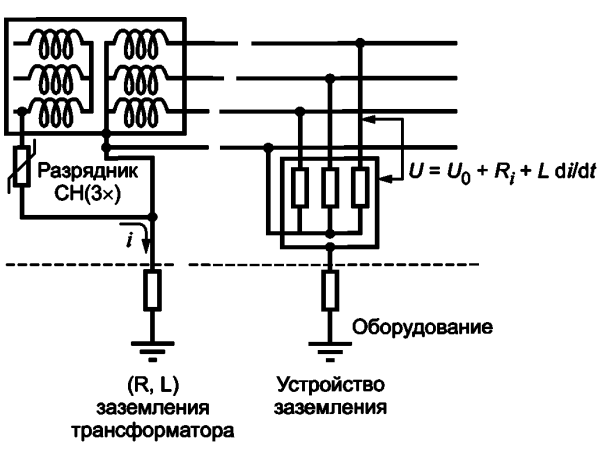


Рисунок 8а

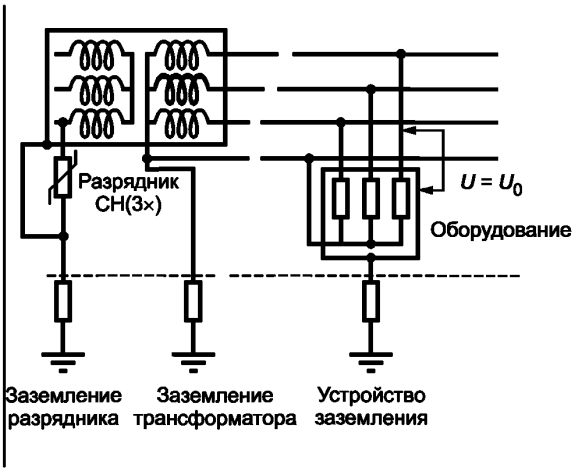


Рисунок 8b

Рисунок 8 — Типовые механизмы связи по земле

В системе TN меньшие перенапряжения будут в случае, если нейтраль повторно заземляется в элетроустановке потребителя. Следует отметить, что при использовании этого вида резистивной связи можно избежать выполнения отдельной системы заземления для части НН трансформатора.

Типичное значение перенапряжения, переданного за счет емкостной и индуктивной связи на вторичную сторону трансформатора СН/НН, составляет 2 % между фазным и нейтральным проводником и 8 % между фазным проводником и землей от напряжения фазы к земле на стороне СН. Эти значения типичны для нагруженной цепи НН. Когда сторона НН трансформатора не нагружена или очень незначительно нагружена, значения могут быть значительно выше в зависимости от параметров системы СН.

Грозовые перенапряжения в системе СН вызывают намного меньшие импульсы тока (обычно меньше 1 кА), чем при прямом ударе молнии и перенапряжения передаются в систему СН практически только через емкостную связь и не превышает нескольких киловольт. В таких случаях перенапряжение, вызванное непосредственно в системе СН (по крайней мере, в части, которая находится недалеко от точки воздействия молнии), вообще выше чем то, которое передано со стороны системы СН. Если срабатывает УЗИП или происходит искровой разряд, ток будет небольшим и соответственно резистивная связь незначительна.

5.4 Импульсные перенапряжения, вызванные прямым ударом молнии в низковольтную линию

5.4.1 Ожидаемые перенапряжения

Как приведено в разделе 5.2 настоящего стандарта и в приложении А, чрезвычайно высокие значения перенапряжений возникают при прямом ударе молнии в линию. Разряды происходят между всеми проводниками линии и в большинстве случаев на заземлитель в месте около точки удара (прежде всего на концах). Искровой разряд может также произойти в незащищенных установках, питающихся от данной линии.

В объединенной системе линия/кабельная система перенапряжения будут несколько уменьшены из-за более низкого импульсного импеданса кабелей по сравнению с воздушными линиями. Количественно уменьшение зависит от продолжительности и от величины полной емкости системы относительно земли. Однако, обычно это уменьшение не достаточно, чтобы избежать перенапряжений, превышающих нормальные уровни изоляции в установках СН. Поэтому прямой удар молнии в линию СН обычно приносит определенный ущерб.

5.4.2 Практические ограничения

Практически перенапряжения ограничиваются защитными устройствам, которые устанавливаются на трансформаторной подстанции и в установке потребителя. Однако такие устройства будут подвергаться серьезным воздействиям с высоким риском повреждения элементов УЗИП при прямом ударе молнии, если они специально не предназначены для этой цели.

5.5 Грозовые импульсные перенапряжения, индуцированные в низковольтную линию

5.5.1 Ожидаемые перенапряжения

Оценки ожидаемых индуцированных перенапряжений в системах НН в результате удара молнии на некотором расстоянии от воздушной линии могут быть получены по формуле (4), приведенной в п.5.2.2. Согласно этой формуле индуцированные перенапряжения выше номинальных значений допустимого напряжения по изоляции НН могут произойти даже для случая удара молнии на 10-километровом расстоянии от линии.

Данный вид перенапряжений является определяющим для систем электроснабжения НН с использованием воздушных линий. Индуцированные грозовые перенапряжения возникают главным образом между проводами и землей. Разность потенциалов между проводниками является первоначально небольшой, особенно когда используются скрученные проводники. Однако, из-за различия нагрузок на фазных проводниках (в зависимости от системы НН), может произойти пробой защитных устройств и т.п., также могут возникнуть значительные усилия между линиями.

Пример, иллюстрирующий индуцированные перенапряжения в системах НН, приведен на рис. 9. Принимается что проводники (включая нейтральный проводник) скручены. Кроме того, нейтральный проводник заземляется с обоих концов линии. Замечено, что напряжения показывают ослабленные колебания с частотой равной характерной частоте линии.

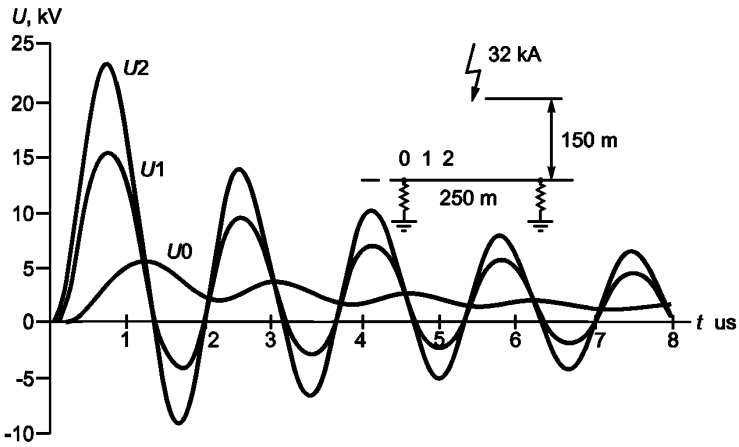


Рисунок 9 — Типовые перенапряжения, индуцированные в низковольтной линии при ударе молнии

5.5.2 Оценка вероятности возникновения

Оценка числа индуцированных перенапряжений в линии НН в функции амплитуды может быть сделана на основе формулы (4), приведенной в п. 5.2.2 настоящего стандарта. Моделирование перенапряжений было выполнено для линии высотой 5 м и длиной 1 км [3], принимая нормализованную плотность ударов молнии (H_g) 1 удар на км^2 в год, и распределение тока молнии, предложенное CIGRE [2]. Результаты измерений, основанные на той же самой модели, были подтвержденные экспериментальными данными по линиям НН в течение восьми лет.

Число индуцированных перенапряжений может быть получено по формуле, проверенной на основании модели, установленной TF CIGRE 01/01/33:

$$N_i = 1{,}9 \times 10^{-6} \times N_g; \quad H \times L\left[3{,}5 + 2{,}5\log\frac{30(1-c)}{U}\right]^{3{,}75}. \qquad (5)$$

В этой формуле N_i число индуцированных перенапряжений, H_g, H, L, и U определяются как в уравнениях (2), (3) и (4), а c является понижающим коэффициентом, зависящим от заземления нейтрального или защитного проводника (фактор c может колебаться от нуля, в отсутствие такого проводника, до 0,7 или даже 0,9 в случае многократного заземления нейтрального проводника в жгуте).

Большое количество измерений подтвердили важную роль многократно заземляемого нейтрального проводника, что видно из формулы (5) и доказывает, что число индуцированных перенапряжений пропорционально квадрату длины промежутка между двумя заземлителями нейтрали и чем ближе к этому заземлителю делаются измерения, тем меньшими становятся перенапряжения.

На рис.10 приведено сравнение кривых, полученных из моделирований Иоханнесена с моделированием по CC05 (при $c = 0$). Другие результаты моделирования, выполненные Electricite de France по программе также представлены на том же рис. А.4. Чтобы сделать сравнение достоверным, все данные были нормализованы для линии длиной 1 км и высотой 10 м, с $H_g = 1$ (предполагается, что N_i пропорционален H_g, H и L). Нужно отметить, однако, что при моделировании делаются несколько различные допущения. Например, при моделировании по программе, линия подключалась к трансформатору СН/НН с одной стороны и оставалась разомкнутой на другом конце. По информации [3], линия заканчивалась соответствующим импедансом (нет отражения) и рассматривались воздействия вдоль сторон линии. Поэтому, прямое сравнение кривых затруднительно, но результаты можно рассматривать как общую оценку ожидаемых перенапряжений относительно характеристик молнии.

Эти кривые представляют предполагаемые перенапряжения (не под влиянием любой реакции системы, такой как пробой). В практических случаях присутствуют искажения и ограничения связанные с наличием многократных ответвлений, кабельных вставок, нагрузок, пробоям, защитным устройствам от перенапряжения и т.п. Статистические кривые, приведенные на этом рисунке, будут несколько отличаться в реальных условиях. В частности частота появления перенапряжений с превышением величины нормального уровня изоляции линии меньше.

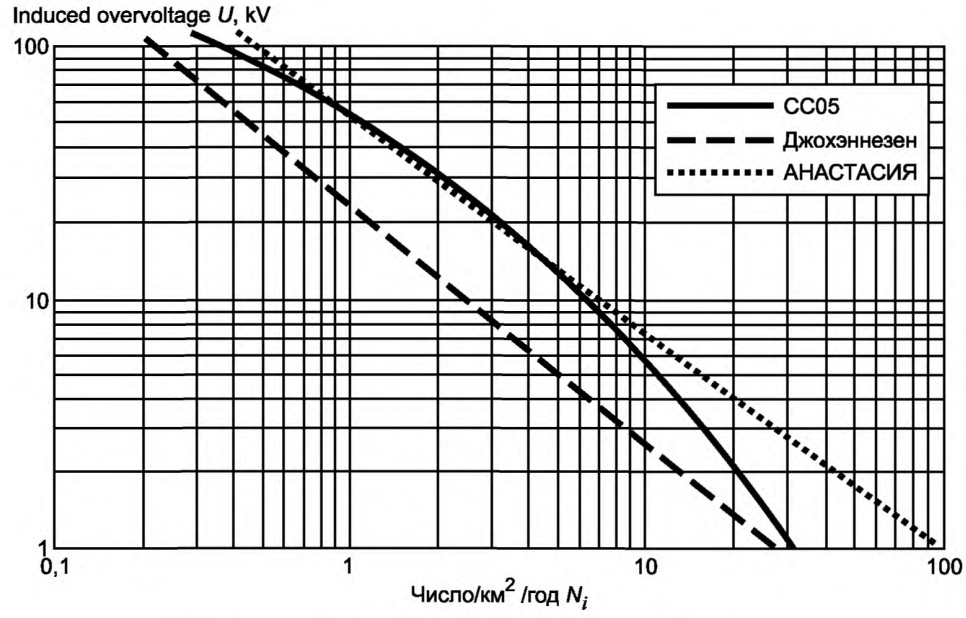


Рисунок 10 — Пример частоты возникновения индуцированных перенапряжений при ударе молнии в воздушную линию НН

5.6 Примеры индуцированных перенапряжений

На основании предыдущих данных о возникновении перенапряжений можно было бы ожидать большее число отказов оборудования чем то, которое фактически наблюдается. Это несоответствие может быть объяснено несколькими факторами: реальной вероятностью события в данной установке, шунтирующее действие разнообразных путей стекания импульсных токов, реальным поведением линий электропередач, воздействием как линейных, так и нелинейных нагрузок, наличием УЗИП, наличием случайных пробоев на землю при экстремальных перенапряжениях, и т.п.

5.6.1 Моделирование

Как пример моделирования ожидаемых перенапряжений, приведем применение метода Монте-Карло для модели системы электроснабжения НН, показанной на рис. 11. Плотность ударов молнии 2,2 на км^2

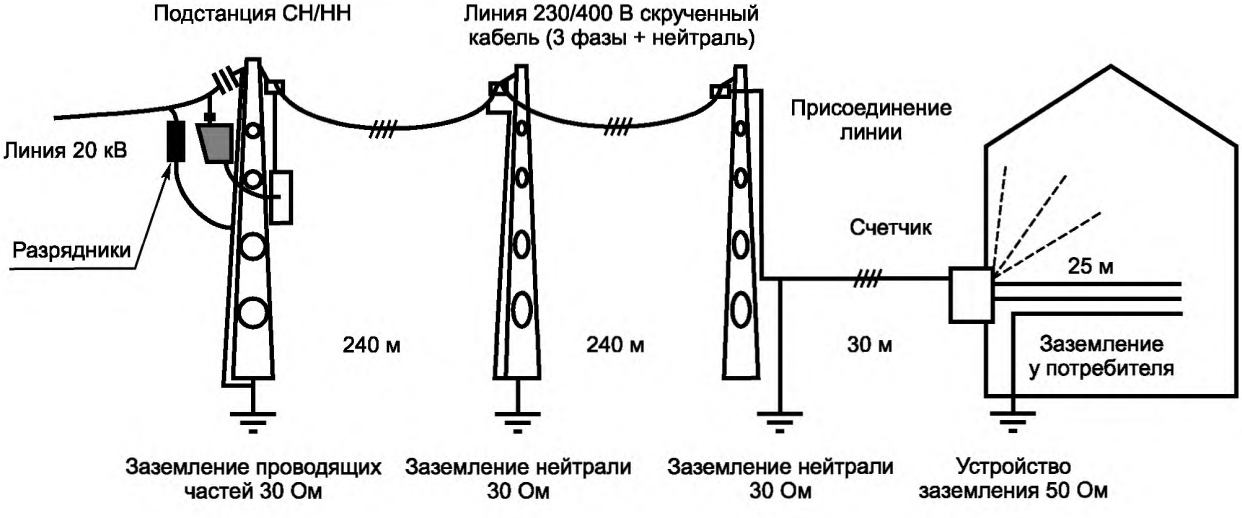


Рисунок 11 — Модель системы электроснабжения

в год, все нагрузки были смоделированы резисторами, независимыми от частоты. Таблица 3 показывает результаты этого анализа. Последний столбец показывает высокие уровни перенапряжений, но они происходят только в случае прямого удара молнии в систему НН. Вероятность возникновения таких импульсов в этом примере составляет один раз в 22 года.

Таблица 3 — Среднегодовые уровни перенапряжений в низковольтных установках (кабели проложены в земле)

	> 1,5 кВ	> 2,5 кВ	> 4 кВ	> 6 кВ	> 20 кВ
Не нагруженная система ТТ	6	3	1,8	1	0,045
Нагруженная система ТТ	4	1,7	1	0,5	0,045
Нагруженная система TN	1	0,6	0,35	0,25	0,045

Примечание 1 — Значения, приведенные в таблице, были получены для скрученной кабельной системы электроснабжения. Для системы электроснабжения, выполненной с использованием воздушной линии с отдельными проводниками, уровни напряжения могут быть в два раза выше при той же самой вероятности события.

Примечание 2 — В этом примере для модели применительно к системе TN, было определено, что значение импеданса заземления не оказывает существенного влияния, потому что нейтральный провод лини НН соединяется непосредственно с землей.

Приведенный анализ демонстрирует это для типовой линии НН, представленной на рис. 11, и для плотности ударов молнии 2,2 на км^2 в год, предполагаемое число перенапряжений, превышающих уровень изоляции, определенный МЭК 60664-1, 4 кВ для системы TN с напряжением 230 В, составляет порядка одного события в год.

В п. 5.5.2 ссылка делается на измерения, выполненные в областях с подобной плотностью ударов молнии в землю (2—3 удара на км^2/год). Измерения были выполнены на линиях НН между рабочими проводниками и локальным заземлителем на объекте измерения. Поэтому, эти данные (перенапряжения сверх 4 кВ приблизительно 10 раз в год), непосредственно не сопоставимы с результатами моделирования, представленными в таблице 3. Однако, принимая во внимание конкретные параметры, использованные для схемы модели, и того факта, что в этом случае исследуются напряжения линии относительно земли в пределах установки, можно считать, что данные измерения и моделирования находятся в разумном согласии.

Примечание — Этот анализ был дополнен дальнейшими вычислениями с учетом установки УЗИП с уровнем защиты 2,5 кВ на вводе установки. Также было вычислено значение тока протекающего через УЗИП. Эти результаты моделирования подтверждают, что импульсные токи, индуцирующие перенапряжения, обычно меньше 1кА. Например, максимальный ток УЗИП составил только 60А при ударе молнии в землю с током 100 кА на расстоянии 200 м от линии НН. Ток в УЗИП был также вычислен для случая прямого удара молнии в линию с током 100 кА в 250 м от трансформатора СН/НН, ток в УЗИП составил приблизительно 200 А. Эти два результата были получены для принятого сопротивления заземления 50 Ом на вводе. Снижение сопротивления заземления ведет к увеличению токов УЗИП.

5.6.2 Измерения

Измерения, проведенные во Франции, показали, что вероятностные значения таблицы 3 очень часто не достигаются потому, что практически линия НН обычно соединена со многими установками и в любой части системы НН может произойти срабатывание разрядника или возникнуть искровой разряд, уменьшающие перенапряжение в системе.

Данные по систематическому контролю перенапряжений с нескольких сайтов, недавно созданных в Германии, приводятся в таблице В.3. Причина перенапряжения, — коммутация или молния — не идентифицируется в этом обзоре. Возможно, что несколько событий на верхнем уровне (четыре события выше 2 кВ и два события выше 6 кВ) в общей сложности 151 события выше 1 кВ (среди 3 000 событий выше 500 В), были связаны с ударами молнии.

5.7 Перенапряжения, при ударе молнии в здание или в непосредственной близости

5.7.1 Распределение тока разряда молнии среди параллельных установок

Когда молния ударяет в здание, которое является одним из нескольких параллельно запитанных

приемников от системы электроснабжения НН, ток молнии в землю[1)] делится среди нескольких возможных путей. Они включают локальную землю (заземлитель здания), так же как и внешние заземлители и все металлические связи, прежде всего кабель электропитания.

Чтобы определить количественно это распределение дисперсии, были смоделированы два примера с использованием программ, приведенных в приложении А, а результаты представлены на рисунке 12, где изображены два здания, запитанные от подстанции, здание 1 поражается молнией как определено в МЭК 62305-4.

Для здания 1 на рисунке 12 ток разряда молнии i_{imp} от молниеприемника стекает вниз по токоотводу к системе заземления.

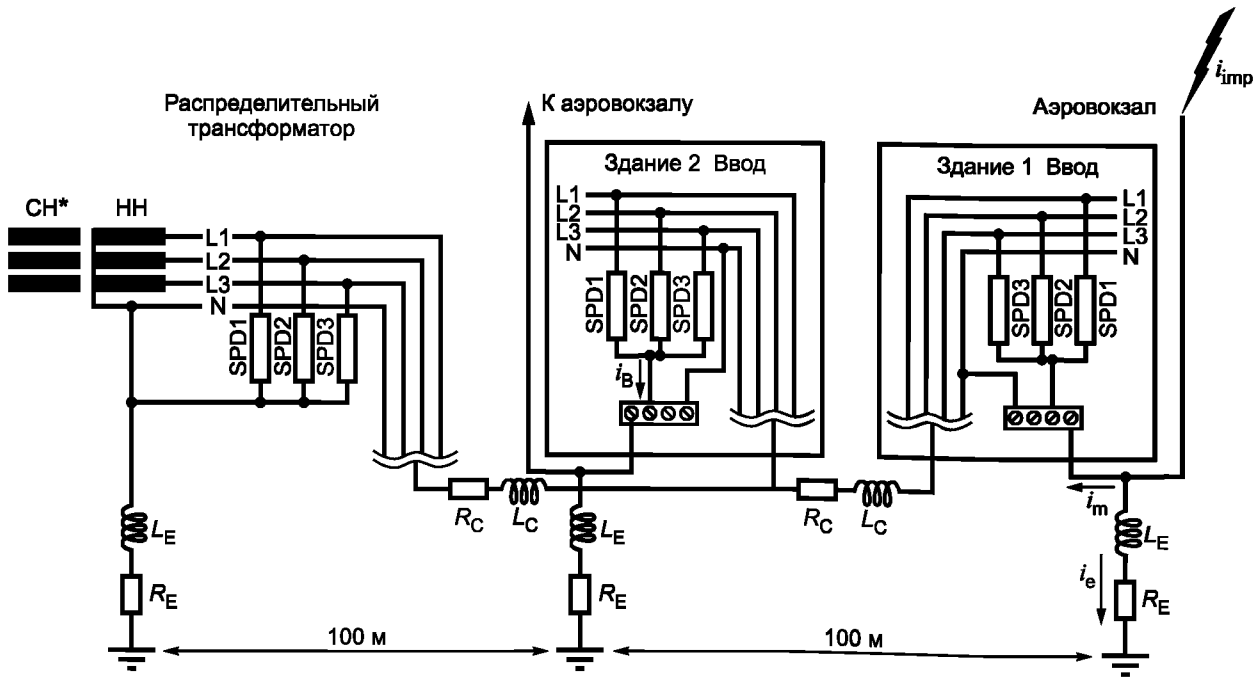
В этой точке ток молнии делится на две составляющих: ток i_e — стекает на локальный заземлитель здания, ток i_m — течет по кабелю электропитания к удаленной земле. Эти два тока делятся обратно пропорционально отношению импедансов.

В начальной фазе импульсного тока, текущее разделение определяется отношением индуктивностей. В хвосте, где уровень изменения тока незначителен, разделение определяется отношением сопротивлений как в (6):

$$i_m/i_e = R_e/R_m, \quad (6)$$

Для нескольких электрически соединенных зданий эффективное значение сопротивления R_m уменьшается согласно (6) за счет того, что часть тока молнии, который стекает с пораженного здания в систему НН, увеличится за счет того, что большое число зданий соединено параллельно.

Для примера на рисунке 12 в таблице 4 приведены амплитуды токов для возможных путей на заземлитель (после прохождения основной индуктивности), определенных путем цифрового моделирования, подробно рассмотренного в приложении А. Для этих вычислений не было найдено никаких доказательств наличия колебаний, вызванных отражениями, из-за значений импедансов заземления ниже 10 Ом и отсутствия емкости, приведенной в модели. Другие примеры распределения токов даются в приложении А.



* сторона СН не определена.

Рисунок 12 — Модель для вычисления распределения тока молнии между параллельных зданий на примере системы TN-C

[1)] Путь тока молнии, поскольку он делится среди возможных путей, часто представляется, как возникающий из облака и текущий в землю. Нужно отметить, однако, что для отрицательного разряда от облака к земле (рис. 3), молния представляет «обратный разряд» от земли — «в землю» — с нейтрализацией положительных зарядов отрицательными зарядами в канале молнии (содержащим ответвления) и облаке.

В разных странах используются различные способы заземления нейтрали, так что возможны некоторые отличия в распределении тока разряда молнии по возможным путям, но общий принцип, проиллюстрированный примером, остается применимым. Поскольку в системе TN-C-S никакое УЗИП не включается в нейтраль, а нейтраль заземляется у каждого здания, обеспечивается некоторое облегчение для других УЗИПов связанных с линейными проводниками. Разработчики системы должны принять эти различия во внимание.

В качестве общего заключения можно констатировать, что чем выше плотность зданий в зоне, тем большая часть тока разряда молнии, стекает на заземлитель через питающий кабель системы НН. Это заключение относится и к поражаемому зданию и к смежным зданиям.

Таблица 4 — Распределение токов по возможным путям растекания для примера рис. 12 (10/350 мкс, 100 кА)

Путь тока к земле	Приблизительное амплитудное значение тока, (не начальное) кА	Приблизительная величина заряда Кул
Заземляющий электрод (ы) здание 1 ($i_{Earthing}$)	33	16,5
Выход от здания 1 к зданию 2		
Общий ток (I_m) в кабеле электропитания	66	33
Ток в нейтрали	17	9
Ток через SPD1	16	8
Ток через SPD2	16	8
Ток через SPD3	16	8
На заземляющий электрод здания 2		
Общее значение	34	16,5
Ток в нейтрали	9	4,7
Ток через SPD1	8	4
Ток через SPD2	8	4
Ток через SPD3	8	4
Выход от здания 2 к трансформаторной подстанции по кабелю электропитания		
Общее значение	33	16
Ток в нейтрали	9	4,5
Ток в фазе 1	8	4
Ток в фазе 2	8	4
Ток в фазе 3	8	4

5.7.2 Перенапряжения, связанные с распределением токов

Распределение токов по возможным путям вызывает перенапряжения, прежде всего между проводниками и локальной землей. В зависимости от конфигурации установки НН и наличия или отсутствия УЗИПов, эти перенапряжения могут быть большими или умеренными. Некоторые примеры, полученные при моделировании и описанные выше, более подробно рассмотрены в приложении А.5, где описываются два примера перенапряжений, являющихся следствием импульсных токов на вводе установки. В этих примерах, импульсный ток был введен на ввод конкретных зданий и были измерены перенапряжения, возникающие в выбранных точках в здании.

Следует отметить, что наземное повышение потенциала, при прямом ударе молнии в здание или конструкцию обычно превышает допустимый уровень изоляции низковольтной установки и следовательно приводит к пробою и перенапряжениям, которые распространяются к смежным зданиям (установкам), соединенных с той же самой низковольтной распределительной сетью.

Следовательно, даже при прокладке кабелей в земле, в здании, не пораженном ударом молнии, может возникнуть перенапряжение. Число зданий (установок), которые включаются в этот процесс распространения, увеличивается с увеличением удельного сопротивления грунта. Кроме того, для данной плотности ударов молнии, присутствие высокого здания, хотя и уменьшает вероятность прямых ударов в меньшие здания находящиеся вблизи, увеличивает вероятность индуцированных перенапряжений.

Пернапряжения между проводниками и локальной землей повреждают изоляцию соединенного оборудования, которое обычно имеет достаточный, уровень согласно указаниям МЭК 60664-1, в то время как

рабочие компоненты энергетического оборудования повреждаются перенапряжениями, возникающими между проводниками. На первый взгляд может показаться, что наиболее опасная ситуация связана с перенапряжениями на энергетическом оборудовании. Однако перенапряжения на заземлителе могут стать проблемой не столько для изоляции энергетического оборудования, а как результат перехода потенциала на нижний уровень между системой питания и коммуникационной системой, которая может быть соединена с оборудованием. Эта потенциальная проблема обсуждается более подробно в разделе 8 и в приложении D.

Как рассматривалось выше, различия, существующие в способах заземления нейтрали и установке УЗИПов, если таковые вообще имеются, мешают давать числовые результаты широкого применения, и должны быть приняты меры предосторожности от ошибочного обобщения рассмотренных примеров.

5.7.3 Частота возникновения

Ежегодная частота прямых ударов молнии в сооружение N_d, может быть определена по плотности ударов молнии в землю N_g (количество ударов на 1км^2 в год) и эффективной площадью сооружения A_e (км^2) следующим образом:

$$N_d = N_g \times A_e. \quad (7)$$

Эффективная площадь сооружения определяется как площадь земной поверхности, имеющей ту же самую частоту прямых ударов молнии, как и рассматриваемое сооружение. Она является функцией размеров сооружения и зависит от топологии фундамента и окружающих объектов (см. МЭК 2305-3).

Для прямоугольного сооружения на плоской поверхности A_e определяется следующим образом:

$$A_e = 10^{-6}(A+3h \times p + 9\pi h^2), \quad (8)$$

где

A — горизонтальная площадь сооружения в м^2;

h — высота сооружения в м;

p — периметр крыши в м.

Величина N_g, без учета мелких зданий порядка 10^{-2} — 10^{-3} в год. Однако вероятность возникновения перенапряжений в низковольтной сети из-за ударов молнии в соседние здания будет намного выше, но с более низкими уровнями напряжения. Например, моделирования, проведенные для типовой воздушной линии, показывают, что уровень возникновения последующих перенапряжений (распространением) находится в пределах 0,1—0,3 события в год.

Уровень напряжения зависит от характеристики грунта, типа линии (воздушная линия, в земле) и от параметров заземления нейтрали. Если нет точных данных по частоте возникновения на разных уровнях напряжения, то МЭК 62305-2 обеспечивает некоторое руководство по применению.

5.8 Выводы относительно грозовых перенапряжений

Источник грозовых перенапряжений находится вне человеческого управления и их значимость для объектов, использующих электроэнергию, зависит от многих параметров, определенных местом воздействия удара молнии и структурой системы электроснабжения. В то время как структура системы электроснабжения находится под человеческим контролем, его параметры обычно определяются другими соображениями помимо молниезащиты.

Эти перенапряжения могут быть классифицированы по точке попадания: прямой удар, удар в непосредственной близости , удаленный удар. При прямом ударе молнии, перенапряжения возникают из-за прохождения тока молнии по конструкции и связанной системе заземления. Удар в непосредственной близости вызывает индуцированные перенапряжения в замкнутых цепях и до некоторой степени повышает потенциал на заземлителе. Удаленные удары молнии приводят к перенапряжениям ограниченным замкнутыми цепями.

При ударе в непосредственной близости могут возникать существенные динамические силы, но вероятность таких значительных сил ниже, чем сил более низкой величины связанных с более удаленными ударами молнии. В любом случае, статистические данные, по анализу рисков, должны быть учтены при выполнении защиты от этих грозовых перенапряжений.

Причина возникновения молнии и ее характеристики имеют статистическую природу и содержат неопределенность. Например, результаты непосредственных измерений тока, выполненных для высоких башен, вообще не укладываются в имеющиеся представления. Географический район, включая климатические условия, также может оказаться существенным фактором.

Отметьте, что любое предложение по применению теоретических соображений или результатов ограниченных измерений по определению отношения между частотой возникновения и величиной грозовых перенапряжений должны всегда согласовываться с проверками в реальных условиях, как это рассмотрено в разделе 9.

6 Коммутационные перенапряжения

6.1 Основные положения

Обычно, любое срабатывание выключателя, повреждение, прерывание, и т.п. в электрической установке сопровождается переходным процессом, при котором могут произойти перенапряжения. Внезапное изменение в системе может инициировать затухающие колебания с высокими частотами (резонансные частоты сети), пока система снова не стабилизируется в новом устойчивом состоянии. Величина коммутационных перенапряжений зависит от многих параметров, таких как тип цепи, вид коммутации (включение, отключение, повторное включение), характера нагрузки, и типа выключателя или предохранителя. В этом пункте явление описывается в принципе, с использованием элементарных примеров, чтобы представить общую картину.

На рисунке 13 приведена элементарная цепь RLC при подключении нагрузки и на рисунке 14 приведен типичный переходной процесс, связанный с этим подключением. Напряжение, наложенное на напряжение промышленной частоты системы электроснабжения, приведено в этом примере в пределах приблизительно одного периода. Максимальное напряжение главным образом определяется моментом включения контакта относительно напряжения питания. Самый высокий уровень перенапряжения возникает, когда контакт закрывается при максимуме напряжения (не путать с переходным током, который будет самым большим при включении при 0 В.).

В большинстве случаев, максимальное перенапряжение находится в пределах двойного амплитудного значения напряжения питания, но более высокие значения могут быть, особенно при коммутации индуктивных нагрузок (двигатели, преобразователи) или емкостных нагрузок. Кроме того, отключение токов короткого замыкания, может вызвать значительные перенапряжения. Если отключение происходит, при относительно высоком значении энергии накопленной в индуктивности, то колебания могут произойти на стороне нагрузки вводного выключателя или предохранителя.

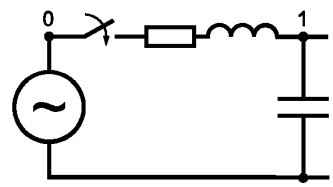


Рисунок 13 — Генерация перенапряжения при коммутации цепи RLC

Частота колебаний во время коммутационных операций определяется характеристиками системы, и иногда могут возникнуть резонансные явления. В таких случаях, могут произойти очень большие перенапряжения. Вероятность резонанса системы на частоте сети обычно низка. Однако если характерная частота коммутируемой части системы близка к одной или более резонансным частотам остальной части системы, то может возникнуть состояние переходного резонанса.

Грозовые перенапряжения, описанные в разделе 5, главным образом основаны на теоретических вычислениях и понятии вероятностных перенапряжений (без учета естественного ограничения напряжения) что и было представлено в предыдущем разделе. Вместо этого данные получаются на основании проведенных измерений и регистрации переходных процессов, происходящих в существующих системах или в лабораторных экспериментах.

Следующие положения относительно коммутационных перенапряжений в большой степени основаны на измерениях в реальных низковольтных системах. Поэтому, напряжения, о которых сообщают, ограничиваются взаимодействием системы и присоединенного аппарата. Кроме того, устройства защиты от перенапряжений (УЗИП) в системе (и встроенные УЗИП) ограничивают измеренные напряжения. Этот факт должен быть учтен при рассмотрении числовых значений, приведенных в этом разделе и в приложении В.

Типичная форма коммутационных импульсов определяется реакцией низковольтной установки. Эта ситуация приводит в большинстве случаев к затухающей волне, как показано на рисунке 14. На рисунке 15 приведен пример измеренного коммутационного перенапряжения, записанного в реальной системе, который демонстрирует подобные характеристики, но с более высокой частотой, чем показано на рисунке 14.

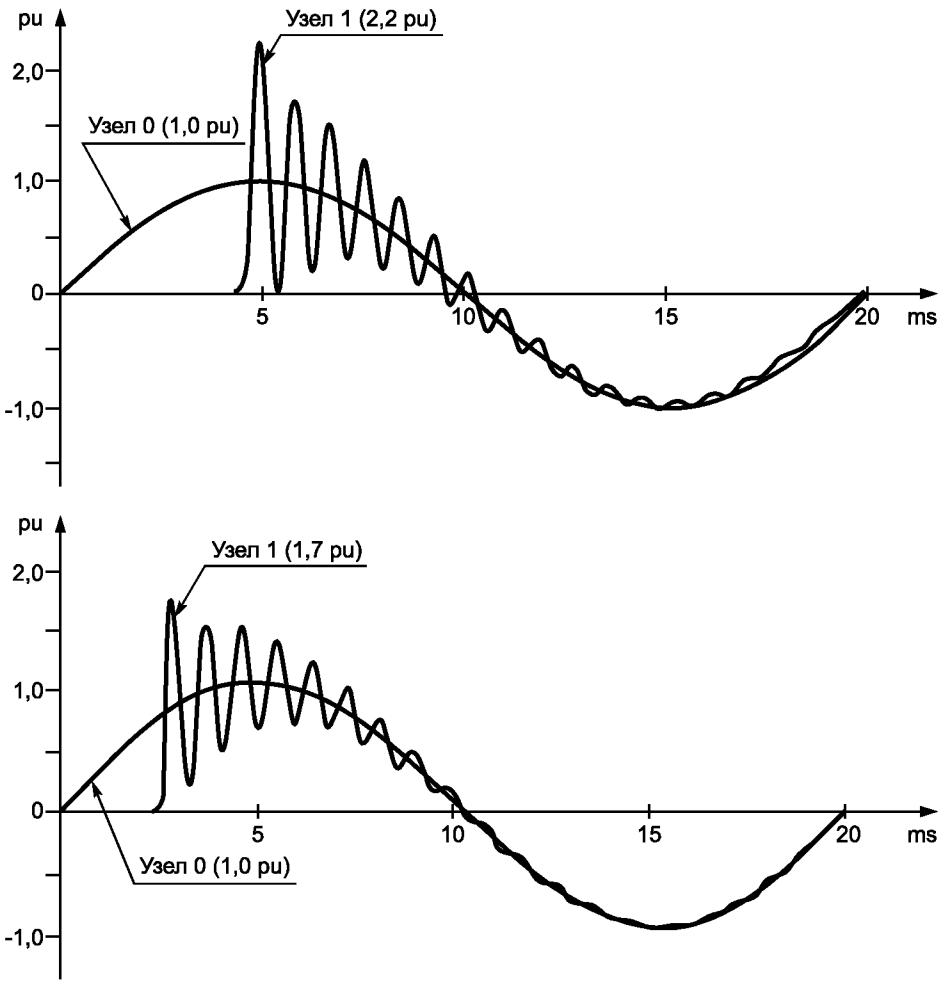


Рисунок 14 — Типовые коммутационные перенапряжения

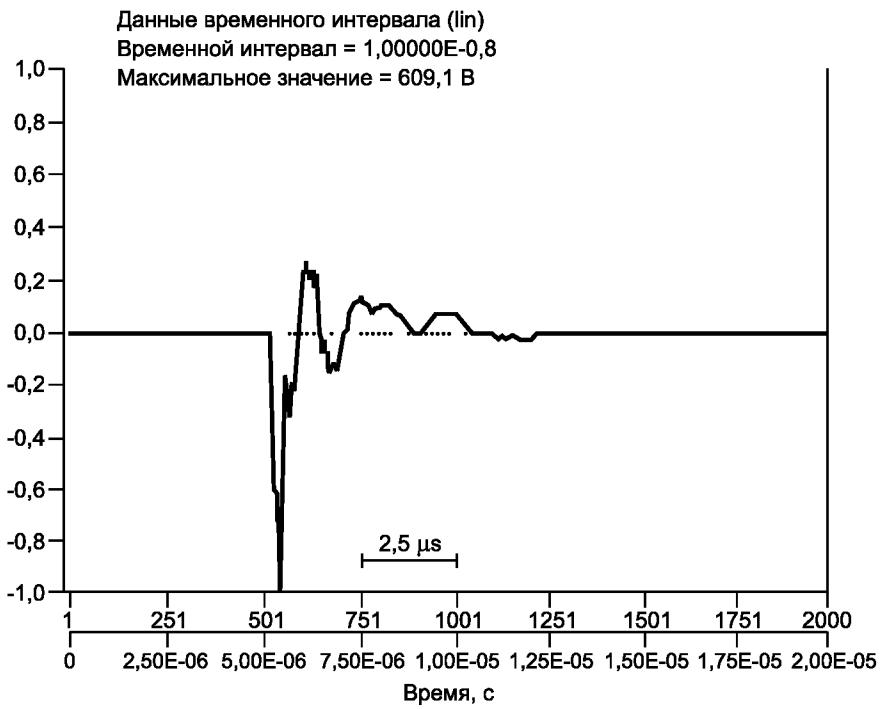


Рисунок 15 — Пример высокочастотного импульса коммутационного перенапряжения

Частота колебания обычно находится в пределах нескольких сотен килогерц. Время достижения максимума обычно находится в диапазоне 0,1—0,5 мкс, а максимальная производная обычно находится в пределах нескольких кВ/мкс. Типичное распределение максимальных уровней перенапряжений (которое не включает очень короткие импульсы), приведено на рисунке 16.

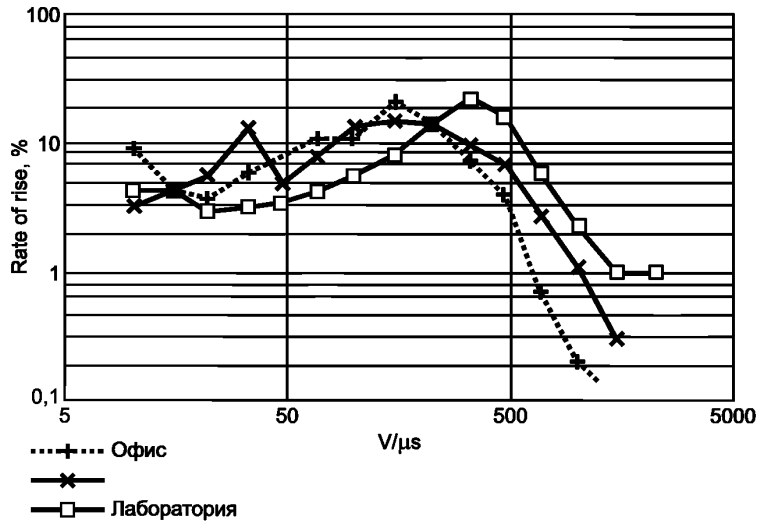


Рисунок 16 — Распределение импульсных коммутационных перенапряжений в различных случаях по уровню

Поскольку максимальные амплитуды коммутационных импульсов не превышают нескольких кВ, время достижения максимума будет находиться в диапазоне 0,5—2 мкс. Распределение времен достижения максимума приведены на рисунке 17. Поэтому максимальный уровень типовых коммутационных импульсов более или менее соответствует времени достижения максимума для стандартного волнового импульса 1,2/50 мкс или 0,5 мкс к периоду 100 кГц волны. Соотношения для 1,2/50 мкс импульса приведены на рисунке 18 для относительно небольшой амплитуды.

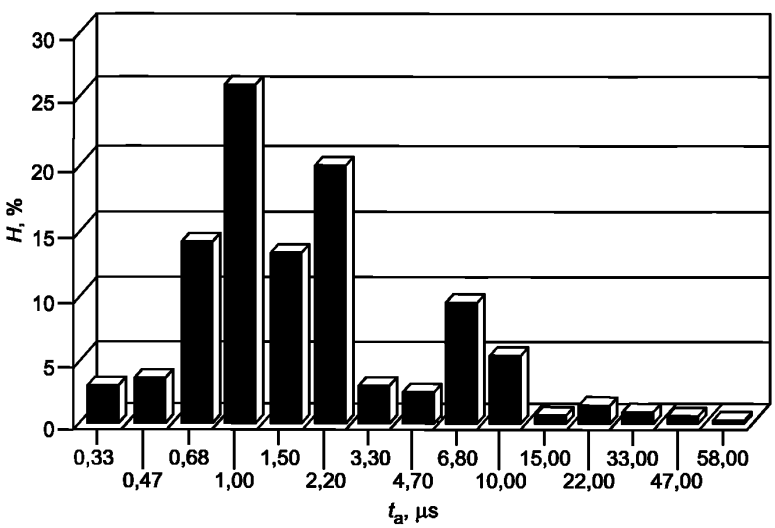


Рисунок 17 — Распределение импульсных коммутационных перенапряжений по времени

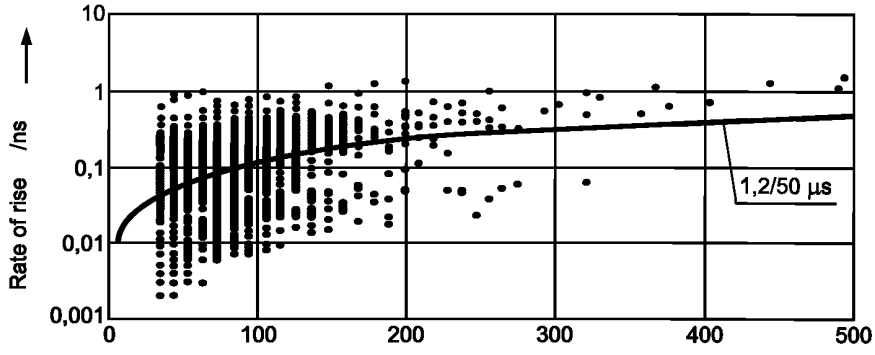


Рисунок 18 — Уровень импульсных коммутационных перенапряжений и их амплитудные значения

Длительность импульсов распределяется по намного более широкому диапазону времени. Если исключить коммутационные перенапряжения, вызванные работой предохранителей с высоким номинальным током в случае отключения тока короткого замыкания, то типичная продолжительность (время, достижения половинного значения) от 1 до 50 мкс приведена на рисунке 19.

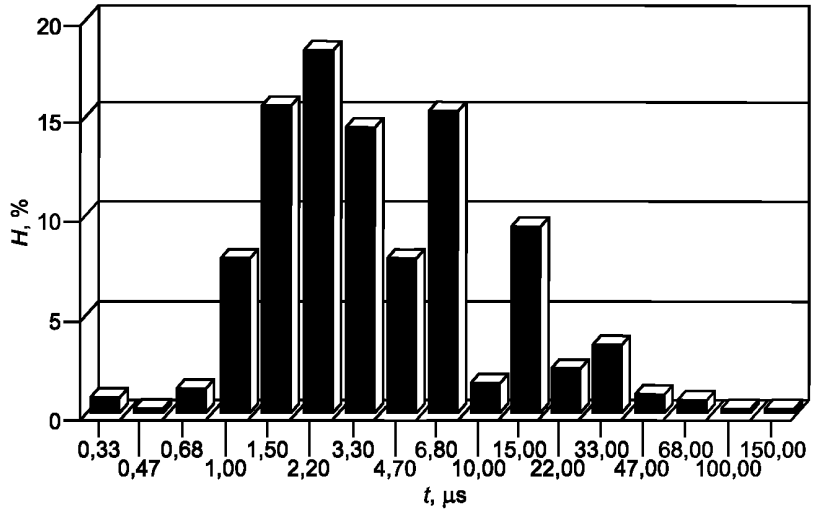


Рисунок 19 — Распределение импульсных коммутационных перенапряжений по продолжительности

6.2 Срабатывание выключателей и переключателей

Выключатели и переключатели широко используются в каждой установке для целей защиты электрооборудования, выключая перегрузки и короткие замыкания, или для того, чтобы управлять работой оборудования, — включение и отключение. Частота коммутаций зависит от области применения и имеет более высокий уровень в промышленных установках и относительно более низкий уровень при бытовом применении.

Коммутируемые токи в случае большинства активных нагрузок находятся в диапазоне номинального тока оборудования. Однако лампы накаливания дают пусковой ток приблизительно в 10 раз превышающий их номинальный ток, поскольку у нити низкое сопротивление в холодном состоянии, что приводит к повышению коммутируемых токов. Для неактивных нагрузок, характерных для промышленных потребителей, коммутируемые токи намного выше номинального тока.

Одна из причин повышения пусковых токов это наличие в сети конденсатора. Например, при подключении телевизора мощностью 100 Вт и номинальным током — 0,4 А, пусковой ток составит приблизительно 20 А, который в 50 раз выше номинального. Другая причина — это отношение максимального значения

несинусоидального тока к его действующему значению, когда максимальные токи выше, чем ожидаемое действующее значение.

Размыкание механической коммутационной аппаратуры вручную или с помощью электромеханического привода вызывает электрическую дугу во время каждого процесса коммутации. Высокочастотное колебание сгенерированное внезапным появлением напряжения зависят от величины индуктивности и емкости в цепи выключателя. Это колебание накладывается на напряжение между проводниками цепи и между проводником цепи и землей и дает полное напряжение, приложенное к изоляции электрооборудования относительно сторонних проводящих частей и других цепей. В отличие от переходных перенапряжений, переданных через распределительную сеть в установку потребителя, коммутационные переходные процессы, сгенерированные в пределах установки потребителя выключателями и переключателями, воздействуют на электрооборудование без существенного затухания, причем амплитуда этих переходных процессов относительно высока.

Величина коммутационных перенапряжений может быть оценена подробными измерениями в электрических установках и их статистической оценкой. Такими измерениями можно охарактеризовать частоту возникновения переходных перенапряжений в зависимости от периода времени года или в будние дни или в определенное время дня. Если такая характеристика от времени существует, то возникновение переходных процессов может произойти из-за события в пределах электрической установки, например, при коммутациях или при оперативном управлении устройствами, которые могут создать возмущения из-за их конструкции.

Измерения в промышленных и других установках показали, что частота возникновения перенапряжений уменьшается с их величиной. В низковольтных системах ожидаемые коммутационные перенапряжения не должны быть выше, чем 4 кВ, потому что при этом уровне величины зазоров в электрооборудовании вероятно будут недостаточны, чтобы предотвратить пробой, и таким образом должно ограничиваться пиковое значение. Как пример, статистическое распределение коммутационных перенапряжений, полученных путем измерений в промышленных системах, приведен на рисунке 20.

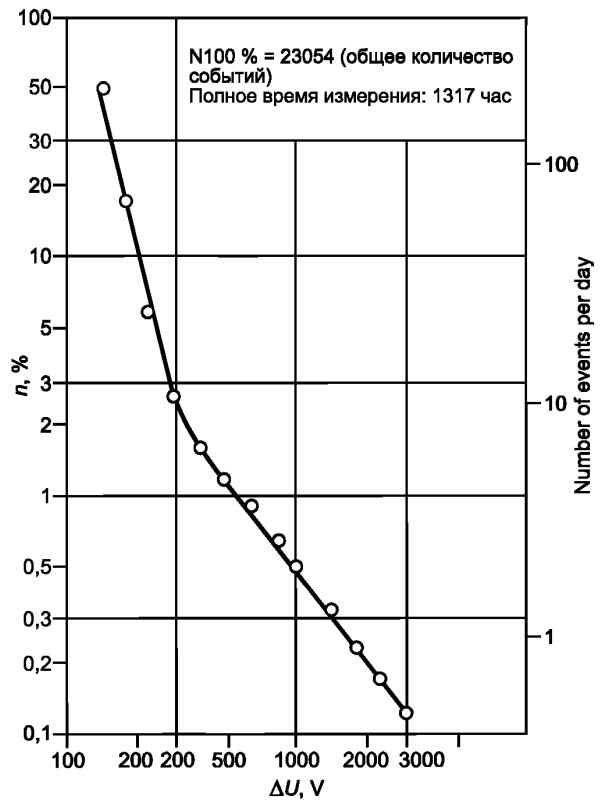


Рисунок 20 — Пример распределения по амплитуде импульсных коммутационных перенапряжений, измеренных в промышленных сетях электроснабжения напряжением 230/400 В

Статистическая оценка расширенных измерений заставила прийти к заключению, что только 1—2 из 1000 записанных коммутационных перенапряжений имеют амплитуду выше 2,5 кВ. Другие длительные измерения, которые выполнялись в установках различного вида и в различных расположениях (см. приложение В), показали подобные результаты. Большинство записанных переходных перенапряжений были даже ниже 1 кВ и только одно значение составляло приблизительно 6 кВ.

Нельзя делать вывод, что влияние выключателей и коммутационных операций незначительно в общей проблеме генерации коммутационных переходных процессов. Данные, полученные в результате измерений, не являются комплексными, и коммутационные импульсы могут возникать чаще, чем эти данные указывают. Поэтому, оценивая необходимость установки УЗИП, это должно быть рассмотрено. В промышленных установках энергия, рассеиваемая на УЗИП, может оказаться относительно высокой.

Примечание — Вышеупомянутые измерения были выполнены в реальных установках с подключенным оборудованием. Поэтому даже если УЗИП, внешнее по отношению к оборудованию, в рассматриваемой установке было разъединено, полученные результаты зависят от характеристик подключенного оборудования (например, зазоров, расстояний утечки, уровня защиты от импульсных напряжений, фильтра и/или УЗИП-компонентов в оборудовании), не дадут реальные значения перенапряжений, происходящих в рассматриваемой установке. Единственный способ учесть их влияние — это выполнение объединенных измерений импульсных напряжений и соответствующих импульсов токов, происходящих в установке, и таким образом получить информацию об энергетическом воздействии на оборудование при отсутствии внешних УЗИП.

6.3 Срабатывание предохранителей

По сравнению с другими импульсами, вызванными оперативными переключениями, возникновение импульсов из-за срабатывания предохранителей возникают менее часто. Однако, в случае отключения короткого замыкания, могут быть сгенерированы весьма существенные коммутационные импульсы. Это явление главным образом связано с влиянием на величину тока короткого замыкания характеристик предохранителя, его номинала и индуктивности цепи.

В электрооборудовании часто используются миниатюрные предохранители с номинальным током от 0,0032 до 10 А.

Коммутационный импульс в случае отключения короткого замыкания миниатюрным предохранителем с номинальным током 1 А приведен на рисунке 21. В этом случае амплитуда коммутацинного импульса довольно высока, но продолжительность довольно коротка. В серии испытаний, выполненных в диапазоне номинальных токов от 1 до 10 А, были определены амплитуды коммутационных импульсов, величина их оказалась довольно постоянна на уровне 2,6 кВ.

Однако из-за увеличенной продолжительности времени (таблица 5) воздействия импульсов, энергия существенно увеличивается с увеличением номинального тока предохранителя. Величина импульса может достигнуть 2,6 кВ/мкс. Для некоторых номиналов предохранителей коммутационный импульс зависит от характеристики предохранителя. Быстродействующий предохранитель вызывает более кратковременные импульсы, чем предохранители медленного действия.

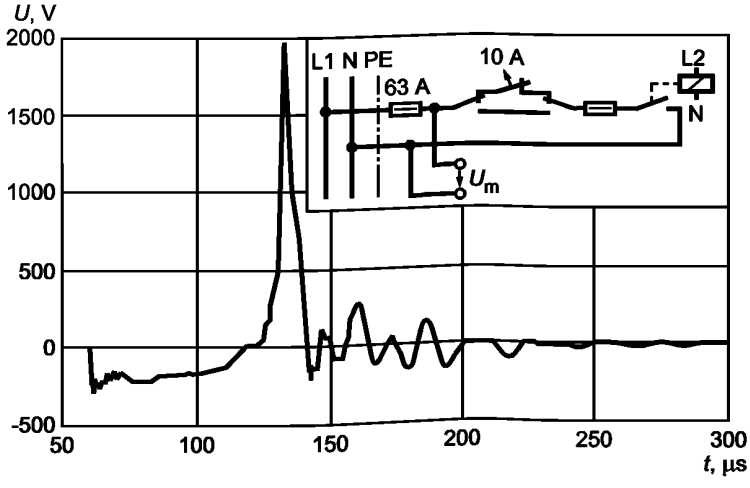


Рисунок 21 — Импульсные коммутационные перенапряжения при срабатывании миниатюрного предохранителя

Таблица 5 — Время достижения половины номинального значения импульсного коммутационного тока при срабатывании миниатюрных предохранителей

Характеристика предохранителя А	Время достижения половинного значения мкс
1	8
1	24
1,6	36
10	64

При отключении короткого замыкания на вводе системы питания предохранителем, установленным вблизи распределительной шины, возникает соответствующая проблема, связанная с тем, что перенапряжение, сгенерированное при срабатывании предохранителя, оказывает влияние на все электрооборудование, соединенное с этой шиной. Опыт, основанный на статистике, показал, что такой отказ в низковольтной сети электроснабжения происходит очень редко. Однако этот тип отказа важен для промышленных систем распределения, где короткое замыкание не является очень редким случаем. В приложение В приведено два примера измерений, один для короткого замыкания, происходящего около предохранителя на вводе, другой для короткого замыкания, происходящего в конец кабеля.

6.4 Частота возникновения

Как относительные значения вероятности возникновения коммутационных импульсов, так и их абсолютные значения могут быть оценены. Первый метод относительных значений является более применимым, если различные измерения и/или помещения должны быть сравнены.

Эмпирическое правило устанавливает, что вероятность возникновения коммутационного импульса обратно пропорционально тройной амплитуде его мощности. Это явление, которое известно как закон тройной мощности, иллюстрируется на рисунке 22 для различных типов помещений. Однако при увеличении амплитуды коммутационного импульса наблюдается тенденция для некоторых отклонений от закона тройной мощности. Эти отклонения являются более явными для некоторых типов помещений, например, для торговых помещений.

На рисунке 22 относительная вероятность возникновения коммутационного импульса амплитудой 2 500 В приблизительно в пять — десять раз больше, чем экстраполяция линии «тройной мощности» в области более низких амплитуд.

6.5 Взаимодействия с устройствами защиты от перенапряжений

Поскольку коммутационные импульсы вызывают ответное воздействие установки на напряжение, ток, и энергию в цепях питания, их энергетическое влияние может оказаться существенным. Однако, как упомянуто выше, их амплитуда часто ограничивается, давая возможность избежать рисков при установке УЗИП. Разработчики системы и разработчики оборудования должны применить УЗИП с должным рассмотрением возможности возникновения коммутационных импульсов с высокой энергией, как рассмотрено в пункте 12.

6.6 Выводы относительно коммутационных перенапряжений

В большинстве случаев максимальные коммутационные перенапряжения находятся в пределах двойной амплитуды напряжения системы, но могут возникать и более высокие значения, особенно при коммутации индуктивных (двигатели, преобразователи) или емкостных нагрузок. Кроме того, отключение токов короткого замыкания может вызывать существенные перенапряжения. При оперативном отключении относительно высокая энергия может быть сохранена в индуктивных нагрузках и колебания могут произойти на стороне нагрузки вводного выключателя или предохранителя.

Величина коммутационных перенапряжений может быть оценена подробными измерениями в электрических установках и их статистической оценкой. Такими измерениями можно охарактеризовать частоту возникновения переходных перенапряжений, в зависимости от периода времени года или в будние дни

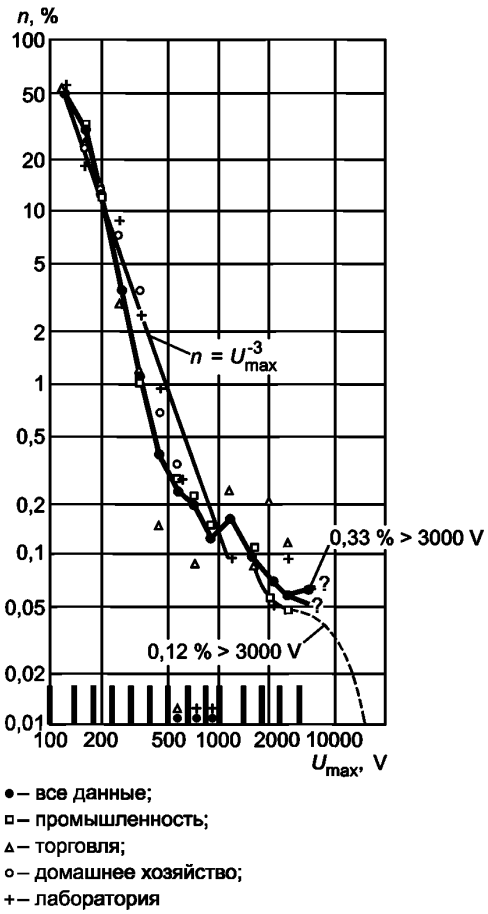


Рисунок 22 — Распределение импульсных коммутационных перенапряжений по частоте возникновения в различных установках

или определенное время дня. Надо опасаться, однако, ограничивающего эффекта неопределенного УЗИП, который может присутствовать в установке. Если такая характеристика от времени существует, то возникновение переходных процессов может произойти из-за события в пределах электрической установки, например, при коммутациях или при оперативном управлении устройствами, которые могут создать возмущения из-за их конструкции.

Эти соображения заставляют оценивать вероятность того, что УЗИП, предназначенное для уменьшения коммутационных импульсов, может эффективно ограничить напряжение. Затем должно быть определено, что УЗИП обладает необходимыми характеристиками относительно величины и продолжительности коммутационных импульсов, которые будут ожидаться в данном помещении.

7 Временные перенапряжения

7.1 Основные положения

Широкий диапазон явлений, возникающих при нормальной работе системы или в аварийных режимах, могут вызвать перенапряжения, которые следует отличать от коммутационных перенапряжений, рассмотренных в предыдущем разделе. Эти перенапряжения возникают в сетях промышленной частоты и обычно связаны с работой защитного оборудования от сверхтока, отключающего поврежденные цепи. Электрооборудование обычно разрабатывается так, чтобы противостоять воздействию временных пере-

напряжений. Импульсные защитные устройства для защиты от ударов молнии и коммутационных импульсов не могут длительно рассеивать энергию для того, чтобы ограничить эти временные перенапряжения. Поэтому, при выборе максимума рабочего напряжения для защитных устройств от импульсных перенапряжений (УЗИП) для конкретной установки, должны быть учтены ожидаемые значения и вероятность возникновения временных перенапряжений.

7.2 Величина временных перенапряжений при повреждениях в линиях среднего и низкого напряжения

Временные перенапряжения определяются как повышенные напряжения переменного тока с существенной продолжительностью по амплитуде, которые могут появиться в системе после повреждения. Обычно они возникают из-за повреждения изоляции или обрыва питающих линий в системах СН и НН электроустановок. Стандарты на электротехнические изделия учитывают эти явления путем предъявления соответствующих требований к оборудованию и испытаниям. В МЭК 60364-4-44 приведена информация и данные, приведенные в приложении С.

Примечание — В линиях СН и НН, смонтированных на одних и тех же опорах, или в линиях с двумя различными уровнями СН, смонтированных на одних и тех же опорах, случайное перехлестывание проводов может вызвать существенное перенапряжение в системе НН. Применительно к УЗИП для низковольтных систем перехлестывание обычно не рассматривается. Однако если такие исключительные явления воззникают, то должен быть применен специальный УЗИП, чтобы выдержать этот режим или, по крайней мере, не быть поврежденным.

В зависимости от конфигурации систем заземления сетей СН и НН, токи короткого замыкания в сетях СН через общий заземлитель генерируют перенапряжения в сетях НН.

Основные параметры, которые влияют на значение и продолжительность перенапряжений приведены ниже.

Все они определяются разработчиками системы электроснабжения:

a) конфигурация заземлителей сетей СН и НН:
- один, два или три независимых заземлителя;
- общие или разделенные заземлители для сетей СН и НН;
- параметры и число заземлителей в распределительной сети НН;

b) тип заземления нейтрали в сети СН:
- изолированная;
- резонансно заземленная;
- заземленная через импеданс;
- непосредственно заземленная;

c) способ отключения повреждения в сети СН:
- длительное время для резонансного и импедансного типов заземления;
- короткое время (<5 с) для низкоимпедансного типа заземления;
- более короткое время для непосредственного заземления.

Временные перенапряжения появляются в различных местах и проявляются по-разному.

- В подстанции СН/НН повышенное напряжение прикладывается к изоляции оборудования НН между токоведущими частями и сторонними проводящими частями, если нет общего заземлителя СН/НН.

- В низковольтной электрической установке повышенное напряжение прикладывается к изоляции низковольтного оборудования между токоведущими частями и сторонними проводящими частями, если нейтраль не соединена с заземлителем.

- Повышенное напряжение появляется между заземлителем низковольтной установки и локальной землей, которое может быть приложено, например, к двойной изоляции оборудования класса II вне здания или ввода, который не соединен с ГЗШ.

В таблице 6 приведена информация о максимальных значениях и продолжительности перенапряжений, которые могли бы произойти в зависимости от конфигурации заземлителя на подстанции СН/НН и конфигурации системы заземления НН. Значения 250 В и 1200 В приведенные в таблице — это максимально допустимые значения согласно МЭК 60364 при использовании объединенного заземлителя систем СН и НН. Практически принимаются нижние значения.

Таблица 6 — Максимальные значения перенапряжений, возникающих при замыкании на землю на стороне напряжения среднего уровня

Тип и система заземления СН при единичном замыкании на землю	Система заземления согласно МЭК 60364-4-44	Максимальное действующее значение напряжения на оборудовании установок НН			Продолжительность повреждения	Максимальная продолжительность
		L-PE	N-PE	L-N	с	час
3х проводная, изолированная нейтраль	TN, TT, IT	U_0	0	U_0	>> 5	Десятки
3х проводная, резонансное заземление или 3х проводная, импедансное заземление	TN, TTb) ITa), c), d)	U_0	0	U_0	>> 5	Сотни
	TTa), ITb), e)	<250 В + U_0	<250 В	U_0	>> 5	
Низко импедансное заземление (Франция)	TN, TTb) ITa), c), d)		0	U_0	<5	Сотни
	TTa), ITb), e)	<1 200 В + U_0	<1 200В	U_0	<5	
3х проводная, непосредственное заземление	TN, TTb) ITa), c), d)		0	U_0	<5	Тысячи
	TTa), ITb), e)	<1 200 В + U_0	<1 200BV	U_0	<5	
4 х проводная, непосредственное заземление (Практика США)	TN	<2,45 U_0	0	<2,45 U_0	<5	Тысячи

Примечание 1. Отсутствие различий, для подклассификаций TTa) и TTb), установленных для системы TT, не влияниет на максимальное действующее значение напряжения, приведенное в таблице.

Примечание 2. U_0 — номинальное напряжение линии относительно земли в низковольтной системе.

Примечание 3. При повышеннии напряжения более чем в 1,5—2 раза к U_0, может привести к отказу УЗИП или даже его разрушению.Поэтому, стандарты на УЗИПы требуют, чтобы при выходе устройств из строя не возникало опасности для людей или пожара. Это условие может быть обеспечено посредством устройства автоматического разъединения, действующего кратковременно или постоянно, в качестве такого защитного устройства используют разъединитель УЗИП.

Примечание 4. Для случаев двойного повреждения требуется специальное рассмотрение.

Примечание 5. Информация, приведенная в таблице 6, представляет максимальные значения, допустимые в соответствии с указаниями МЭК 60364; если при продолжительности повреждения менее 5 с в системах заземления с изолированной нейтралью или в резонансных системах заземления.

Временные перенапряжения могут произойти от эффекта феррорезонанса в питающем трансформаторе, когда у одной из фаз питания СН снижается емкость относительно земли.

7.3 Временные перенапряжения из-за повреждений в низковольтных электрических установках

7.3.1 Временные перенапряжения из-за короткого замыкания между линейным и нейтральным проводником

После переходного процесса значение тока короткого замыкания ограничивается только источником питания и импедансом электропроводки. Эти токи могут быть очень высокими, в диапазоне от сотен до десятков тысяч ампер. Защитное устройство работает на отключение повреждения. В течение этого периода длительностью от нескольких миллисекунд до нескольких сот миллисекунд, но не более 5 с, возникает состояние временного перенапряжения. Значение перенапряжения может быть определено в зависимости

от импеданса источника. Значение 1,45 U_0 считается верхним пределом (см. МЭК 60364-4-44). Подобные условия приводят к пробою изоляции на землю в TN-системе.

7.3.2 Временные перенапряжения из-за пробоя изоляции на землю в НН системах

В системе TN замыкания на землю могут вызвать перенапряжения, сопоставимые с теми, которые происходят в цепях при замыканиях между фазой и нейтралью. Действительно, поперечное сечение обратной цепи к нейтрали источника, сопоставимо с сечением фазного проводника.

В системе TT ток короткого замыкания протекает через проводники PE и два заземлителя. Эти заземлители разделяются, или, по крайней мере, не соединяются преднамеренно. В этом случае ток короткого замыкания остается относительно низким. Повреждение обычно отключается защитными устройствами дифференциального тока. Соответствующее перенапряжение, как полагают, остается ниже, чем $\sqrt{3}\,U_0$.

В IT-системе ток короткого замыкания в случае первого повреждения очень низок: это емкостный ток утечки изолированных проводников распределительной сети, включая установку и фильтры в электрооборудовании. Первое замыкание фазы на землю обычно не приводит к отключению защитного устройства, но вызывает переходные процессы, приводящие к величине перенапряжения близкого к линейному напряжению источника питания.

Примечание — Резонансные явления могут произойти при замыканиях в IT-системах с потребителями, у которых в сети имеются высокие реактивные сопротивления (люминесцентные лампы, реакторы, двигатели, и т.д.), когда частота колебаний (для последовательного соединения реактанса цепи с емкостью системы) близко к номинальной частоте питания. Это явление может вызвать временные перенапряжения в два-три раза выше номинального напряжения линии относительно земли или еще выше. Этот тип перенапряжения возникает во всех установках, получающих питание от трансформатора СН/НН. Также из-за этого явления происходят повреждения УЗИП в некоторых IT-системах.

7.3.3 Временные перенапряжения из-за обрыва рабочего проводника

В трехфазных системах обрыв любого проводника может привести к различным условиям, таким как дисбаланс, повреждения и временные перенапряжения, которые могут косвенно привести к переходным процессам. Например, обрыв нейтрального проводника в несбалансированной, соединенной в звезду системе электроснабжения, может привести к временному перенапряжению, когда в двух фазах напряжение относительно нейтрали достигнет значения линейного напряжения. Это может вызвать повреждения и переходные процессы, связанные с возникновением или отключением повреждения. В этом случае обычно рассматривается воздействие линейного напряжения.

7.4 Вероятность возникновения и оценка ущерба

7.4.1 Временные перенапряжения из-за отказов между системой СН и землей

Пробой изоляции на землю на линиях СН происходят в основном во время гроз или по другим причинам. Отказы из-за временных перенапряжений должны учитываться, когда какие либо факторы риска возникают достаточно часто. Эти факторы перечисляются ниже, вместе с наиболее неблагоприятными условиями, которые могут возникать:

- замыкание на землю в системе СН непосредственно в подстанции;
- ток замыкания на землю при неблагоприятных условиях;
- сопротивление заземления подстанции находится на верхнем уровне от допустимого;
- конфигурация системы СН: тип заземления TT-а (общий заземлитель для систем НН и СН);
- условие воздействия: включенный или нет.

При ударе молнии в линию СН УЗИП, расположенный на стороне СН, принимает ток на заземлитель. Во многих существующих сетях в качестве УЗИП используются искровые разрядники, у которых импульсный ток инициирует ток на частоте питания, который не прерывается при первом переходе через ноль.

Эксплуатирующие службы стремятся минимизировать число замыканий на землю в линиях СН, связанных с неблагоприятными погодными условиями, такими как грозы, гололед и ветер. Если подстанция расположена в помещении, эти меры могут быть самыми эффективными и замыкания на землю могут рассматриваться как событие с очень низкой вероятностью.

Конфигурации систем среднего уровня напряжения четко определены так, чтобы их токи замыкания на землю могли быть определены вычислением даже в том случае, если они сильно изменяются в зависимости от места расположения точки замыкания на землю. Ток, вычисленный для замыкания на землю в определенной подстанции, будет основанием для определения сопротивления заземления в соответствии с требованиями МЭК 60364-4-44. Это исключает точку расположения замыкания на землю как фактор риска. Прочие параметры, такие как число одновременно отключаемых фидеров, следует рассматривать

только в случае, если они приводят к более высоким значениям токов замыкания на землю при замыкании на стороне СН в подстанции.

Вышеупомянутые соображения относительно возникновения неблагоприятных условий являются основанием для оценки вероятности опасного события в системе СН вследствие замыкания на землю на стороне СН в подстанции. Эта вероятность ущерба является одним из факторов риска, который подлежит рассмотрению.

Если искровые разрядники устанавливаются на стороне СН близко к подстанции СН/НН, они обычно сокращают число замыканий на землю. Электрический ток через УЗИП на землю ограничивается коротким импульсом, если искровой разрядник имеет металло-окисный тип. В случае применения искровых разрядников возникает переменный ток короткой продолжительности. В случае применения одних только искровых разрядников возникающий переменный ток, отключается защитным устройством СН за время, зависящее от типа используемого устройства.

Среди систем СН конфигурация ТТ-a (общий заземлитель для систем НН и СН) самая критичная. Правила эксплуатации предписывают использование системы ТТ-b (раздельное заземление систем СН и НН), конфигурация ТТ-a применяется редко по причине недостатка места или трудных условий заземления. На городских территориях и в промышленных зонах землитель у потребителя и заземлитель подстанции обычно имеют близкий электрический потенциал из-за наличия сторонних металлических элементов, таких, как трубы между заземлителем подстанции и заземлителем низковольтной установки. Следовательно, падение напряжения на заземлителе подстанции фактически передается на установку потребителя.

Характеристики защищенности элемента, который, вероятно, будет подвержен воздействию временного перенапряжения, зависят от его режима применения. Например, УЗИП, постоянно подключенный на более низком уровне напряжения, соединяется с системой СН только для очень небольшого отрезка его функционирования; в последнем случае, вероятность совпадения с замыканием на землю на стороне СН чрезвычайно низка и характеристики защищенности, вероятно, будут соответственно низкими.

7.4.2 Временные перенапряжения из-за повреждений в установке НН

Вероятностью повреждения изоляции в обычных низковольтных установках нельзя пренебречь. Эта вероятность увеличивается для старых установок и для оборудования, которое постоянно не включается или устанавливается во влажных или загрязненных помещениях. Обычно, повреждения изоляции с большей вероятностью происходят между активными проводниками и заземленными проводящими частями, чем между активными проводниками рассмотренными ниже. Эффекты от этих замыканий (падения напряжения и в особенности перенапряжения), влияют на УЗИП. Эти эффекты зависят от точки замыкания, а в случае замыкания на землю в системах ТТ — от импеданса заземлителя относительно земли.

Если УЗИП был выбран с максимальным длительным рабочим напряжением (МДРН, U_c) ниже, чем перенапряжение, сгенерированное при повреждении изоляции НН или при обрыве питающего проводника, то ток, текущий через УЗИП, увеличивается очень быстро и происходит тепловое разрушение УЗИП. Эффекты от этого повреждения ограничиваются применением УЗИП, объединенным с тепловой защитой. Такое повреждение УЗИП может оставить установку или оборудование без защиты от перенапряжения.

Если максимальное длительное рабочее напряжение (МДРН) УЗИП, U_c, выбрано равным или выше чем 1,45 U_0 для систем TN и выше чем $\sqrt{3}\ U_0$, для системы ТТ, риск повреждения УЗИП и возникающая потеря защиты от перенапряжений происходит в большинстве случаев. Кроме того, этот риск может возникать и для более низкого значения U_c при некоторых конфигурациях системы или из-за выбора УЗИП. Как отмечено в пункте 7.3.2, исключение может быть для IT-системы, где высокие значения МДРН могут возникать из-за резонансных явлений.

Для остальных случаев, когда возможность потери защиты считают приемлемой, другие риски должны перекрываться; в частности соответствующая защита от короткого замыкания цепи должна быть определена изготовителем и требованиями потребителя.

При обрыве нейтрального проводника перенапряжение между линейным и нейтральным проводником независимо от системы заземления может достигнуть значений, близких к $\sqrt{3}\ U_0$ в трехфазной системе. Перенапряжение может достигнуть 2 U_0 в однофазной трехпроводной системе, когда нагрузка полюсов не сбалансирована; это повышенное напряжение прикладывается к УЗИП, предназначенному для защиты от перенапряжения нагрузок и подключенному между линией и нейтралью. В случай обрыва нейтрального проводника повреждение УЗИП может быть игнорировано по сравнению с ущербом, понесенным другим оборудованием в установке, пока повреждение УЗИП происходит в приемлемом режиме.

В IT-системах из-за возникновения напряжения близкого к линейному напряжению после первого отказа, полная защита УЗИП может быть достигнута, но только если U_c выбирается равным или выше чем,

$\sqrt{3}\,U_0$. Как отмечено в п. 7.3.2, резонансные явления могут произойти при замыканиях на землю в IT-системах, имеющих существенные реактивные сопротивления.

7.5 Выводы относительно временных перенапряжений

Временные перенапряжения — это тип аварийного события, которое чрезвычайно трудно предотвратить в нормальном режиме работы системы электроснабжения. Вероятность его возникновения и уровни перенапряжений, которые могут быть достигнуты, зависят от конфигурации системы электроснабжения, которая определяется, исходя из системных ограничений без учета последствий воздействия перенапряжения на УЗИП.

При применении УЗИП возможны различные варианты, в пределах от применения УЗИП с высоким МДРН, что сделает его защищенным при большинстве временных перенапряжений (но за счет снижения уровня защиты от перенапряжения), до снижения уровня МДРН, из-за желания обеспечить низкое ограничивающее напряжение, необходимое для нагрузок, что ведет к возрастанию риска разрушения УЗИП при временных перенапряжениях.

Эта задача не может быть решена путем задания обязательных требований одной из сторон, участвующей в проектировании, эксплуатации, защите систем электроснабжения и нагрузок потребителей. Ситуация требует сотрудничества между сторонами, определения ограничений технологии и взвешивание условий и последствий в зависимости от специфических особенностей установки и ее назначения.

8 Системные перенапряжения

8.1 Основные положения

В настоящем разделе стандарта рассматриваются причины возникновения перенапряжений в системах электроснабжения переменного тока, а также перенапряжений, связанных с взаимодействием между системами электроснабжения переменного тока и коммуникационными системами, в особенности во время возникновения импульсных токов в одной из систем.

Суть вопроса заключается в том, что наведенное напряжение на оборудовании, в котором произошел отказ (нарушение может также произойти на более низких уровнях напряжения), является результатом возникновения импульса тока в одной из системы или является побочным эффектом от действия УЗИП.

Системное взаимодействие перенапряжений может произойти, даже если порты оборудования со стороны питания и связи защищены УЗИП, по одному в каждом порту или на вводе, с целью обеспечения защиты от перенапряжения. Если отказы или повреждения оборудования все же продолжают происходить, тогда возникают вопросы относительно примененных УЗИП. В этом случае корректирующие мероприятия должны заключаться не в улучшении характеристик УЗИП, установленных отдельно на каждом из портов, а в понимании процесса взаимодействия относительно наведенного напряжения.

8.2 Взаимодействие между системой электроснабжения и коммуникационной системой

Поскольку электронное оборудование входит в бытовую и деловую среду все больше, то включение коммуникационного порта становится таким же частым, как подключение обычного шнура питания к сети питания. Типичным примером соединения системы электроснабжения с телефонной сетью является персональный компьютер (ПК) с модемным соединением или факс. Хотя каждая система электроснабжения и коммуникационные системы могли бы включать схему защиты от импульсов тока, импульсный ток в одной системе вызывает сдвиг в потенциале его контрольной точки, в то время как потенциал контрольной точки другой системы остается неизменным. Различие потенциала между этими двумя контрольными точками появляется через два порта ПК/модема. В зависимости от типа ПК/модема и его защищенности это различие потенциалов может вызывать определенное нарушение или повреждение.

Рисунок 23 иллюстрирует пример ПК, оборудованного модемом, запитанный ответвлением от цепи, которая включает защитный заземляющий проводник, с трехпроводным кабелем, который связывает шасси с точкой заземления распределительного щита. Модем соединяется с телефонным выходом в комнате, проводником присоединенным к защитному устройству, установленному телефонной компанией на вводе телефонной связи. В худшем варианте сетевая и телефонная компания осуществляют ввод в дом в противоположных концах дома. В этом случае соединение заземления осуществляется в самой близкой точке к системе заземления, обычно это труба холодного водоснабжения, специальный заземляющий проводник, или шина уравнивания потенциалов. В ряде случаев длина этого соединения заземления может быть существенной. Результатом может быть большая разность наведенного потенциала во время импульса тока.

Аналогичный пример применим и к другому оборудованию, соединенному с системой питания и с телефонной сетью, такому как факс или автоответчик. Различия могут быть в том, что ПК/модем часто собирается пользователем или ретейлером с использованием нескоординированных элементов, полученных от различных производителей, в то время как факс или автоответчик разрабатывается как один модуль. В случае собранного ПК/модема из этих нескоординированных компонентов нет уверенности в защищенности от наведенного разностного потенциала. В случае факса или автоответчика можно ожидать, что в устройстве, разработанном в одной организацией, учтены все условия. Этот случай рассмотрен в деталях В приложении D.

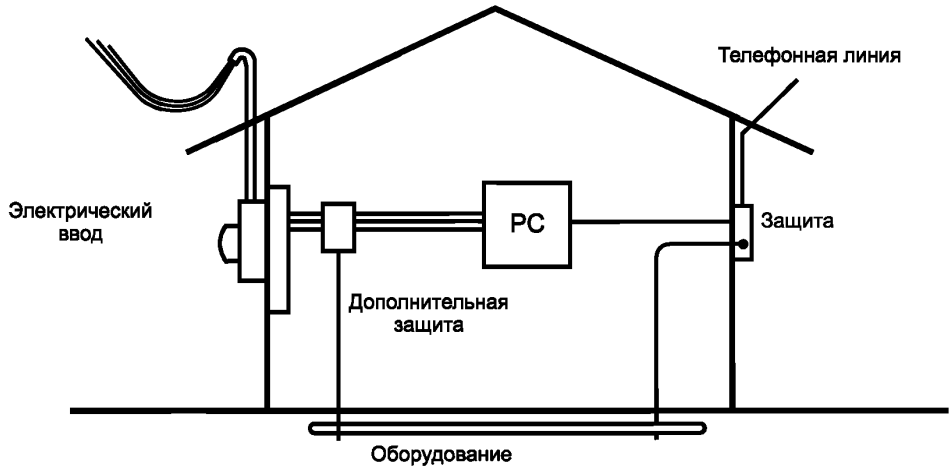


Рисунок 23 — соединения ПК/модема с системой питания и с коммуникационной системой

8.3 Другие взаимодействия

Подобный сценарий может быть применен для телевизионного ресивера или видеомагнитофона с питанием ответвлением от сети и видеосигналом, полученным от системы CATV или спутниковой антенны, расположенной вне дома. Различие заключается в том, что вместо симметричной и сбалансированной конфигурации телефонной пары, видеосигнал переносит коаксиальный кабель, для которого экран является главным источником воздействий от любых импульсов тока. Те же самые соображения применимы к телевизору или видеомагнитофону, как интегрированному продукту в отличие от нескоординированных блоков из отдельных компонентов. Однако с быстро изменяющимся развитием спутниковых систем телевидения в антеннах для применения потребителями трудная цель координации методов заземления кажется достигнутой.

Другой сценарий может развернуться для таких устройств, как промышленная установка, где процесс управления и сигналы от датчиков передаются по отдельным системам, отличным от системы питания.

Возможности уменьшения воздействий включают подбор подходящего гибридного многопортового УЗИП, как рассмотрено в приложении D, и в хорошем заземлении и использовании способов кабельных соединений.

8.4 Выводы относительно системных взаимодействий

Системные взаимодействия происходят в интерфейсе двух различных систем, таких как система электроснабжения оборудования и коммуникационной системы, и касаются сигналов, которые будут обработаны в оборудовании. В этом многопортовом оборудовании могут возникать перенапряжения не только в каждом отдельном порте, но также из-за взаимного влияния терминалов этих двух портов.

Для правильного функционирования и сохранности оборудования необходимо учесть эффекты от этого явления, часто неидентифицированного или неправильно приписанного к одной из систем, что приводит к неудачным попыткам снижения влияния, примененного к одному или к обоим портам.

9 Импульсные перенапряжения и интенсивность отказов

9.1 Основные положения

В ранее приведенных примерах перенапряжений представлены количественные данные об этих явлениях, базируемые частично на теории, которая основывается на наиболее вероятных ситуациях и частично на измерениях. Эксплуатационные измерения могут отразить только локальные условия во время измерений, а лабораторные измерения могут обеспечить только заключения, основанные на предположениях, заложенных в базовую экспериментальную установку.

Вводы и установленные настоящим стандартом положения по перенапряжениям говорят о том, что широкие обобщения при наличии ограниченных данных должны быть сделаны с некоторой предосторожностью. Такая предосторожность это больше качественный, чем количественный процесс, предназначенный для согласования между прогнозами на частоте возникновения больших импульсов и экспериментальными данными измерений, полученными для конкретного оборудования, которое подвергается импульсному воздействию.

Другое качественное предостережение заключается в согласовании между выводами, сделанными из иногда упрощенных предположений для вычислений и основных законов физики. Любые заключения, которые базировались на этих упрощениях, обобщениях или предположениях, которые не соответствуют действительности, должны приниматься с осторожностью относительно законности этих упрощений, обобщений, или предположений.

9.2 Использование статистических данных о повреждениях

На практике нет достаточных статистических данных о повреждениях низковольтного оборудования при перенапряжениях, что затрудняет объективную оценку интенсивности отказов. Отказы низковольтного оборудования (видеооборудование, холодильники, и т.д.) происходят относительно часто во время грозы, особенно в областях, где электроснабжение осуществляется по воздушным линиям НН. Незначительный ущерб, нанесенный токами повреждения, происходят без срабатывания выключателя или предохранителя и возникает после нескольких часов или дней после начального события: воздействия импульсного напряжения. Причины отказов оборудования включают

- недостаточную защищенность порта питания оборудования относительно импульсного воздействия;
- недостаточный класс изоляции;
- старение оборудования;
- системное взаимодействие, в особенности для видеооборудования.

Если для конкретного оборудования известны уровни неповреждающих импульсов или уровни отказов, то можно сделать выводы о частоте возникновения импульсов, превышающих уровень неповреждаемости. Значительное число отказов указывает на соответствующий уровень возникновения импульсов выше этого уровня. Если испытания показывают низкую интенсивность отказов, то это может свидетельствовать об одинаково низком проценте импульсов выше уровня отказа оборудования.

Применение УЗИП и оборудования с блоком питания выпрямитель — конденсатор значительно уменьшают воздействие импульсных перенапряжений.

Исследования отказов ламп накаливания показали что типовой порог выше которго происходит повреждение ламп накаливания лежит между 800 В и 2 000 В для ламп на 120 В, и между 1 800 В и 2 200 В для ламп на 230 В, в зависимости от энергии, воздействующего импульса.

Уровень возникновения импульсов выше этих порогов в режиме линия-нейтраль (обычное соединение ламп, в противоположность режиму линия-земля, который вызывает опасения с точки зрения класса изоляции), не так высок с точки зрения приемлемого срока службы для ламп в НН системе. Импульсные перенапряжения с высокой энергией (такие как импульсные перенапряжения, при прямом ударе молнии) происходят значительно реже, чем импульсные перенапряжения с низкой энергией (такие как наведенные (индуцированные) импульсные перенапряжения). Этот вывод допустим до массового применения УЗИП и должен остаться допустимым, так как механизм возникновения импульсных перенапряжений со стороны питания не изменился, несмотря на быстрое увеличение количества УЗИП. Подавляющее большинство металло-окисных варисторов в системах НН работают нормально, если применяются в соответствии с заявленными характеристиками.

В системах электроснабжения высокие перенапряжения вызывают пробой изоляции электрооборудования потребителей, в связи с чем следует устанавливать защитные устройства для ограничения перенапряжений.

10 Рассмотрение системы простой/оборудование повреждение/возгорание

10.1 Основные положения

УЗИП устанавливаются в системах электроснабжения, чтобы обеспечить защиту оборудования, ограничивая перенапряжения и таким образом улучшая надежность системы.

Надежность системы электроснабжения конечного пользователя включает два различных соображения:

- уход от помех (нарушений) в работе системы;
- предотвращение непоправимого урона системному оборудованию и компонентам.

Для многих ситуаций влияние перенапряжения на оборудование не может быть уменьшено с помощью УЗИП, потому что помехи характеризуются определенным частотным спектром и реакцией оборудования на этот частотный спектр, а не амплитудой перенапряжения. Обычно УЗИП воздействуют на амплитуду перенапряжения, а не на его частотный спектр и широко используется для защиты от непоправимого ущерба, улучшая надежность системы.

10.2 Воздействие помех на работу системы

Воздействие помех, в том числе перенапряжений, на работу системы конечного потребителя зависит от типа электрооборудования у конечного потребителя. Предотвращение воздействия таких помех на работу электрооборудования следует осуществлять при проектировании системы электроснабжения с учетом возможных изменений электромагнитной среды и соблюдения требований стандартов по электромагнитной совместимости (ЭМС), при этом к помехам не относятся нарушения, связанные с неправильным функционированием электрооборудования.

Соблюдение требований по ЭМС должно гарантировать достаточное пространство между уровнем электромагнитных возмущений в среде, в которой оборудование работает с одной стороны, и с другой стороны уровень невосприимчивости оборудования к этим возмущениям. Само оборудование не должно вызывать возмущений выше установленного уровня.

Явления, вызывающие электромагнитные возмущения, могут быть смягчены разными подходами, включая снижение возмущений в их источнике, и уменьшением тех, которыми невозможно управлять, например ударом молнии, увеличение невосприимчивости оборудования путем повышения его собственного уровня невосприимчивости (помехозащищенности) или обеспечение защищенности посредством использования УЗИП.

Раздел 5 настоящего стандарта содержит информацию о том, как возмущения в среде, связанные с ударом молнии, в конечном счете воздействуют прямым вводом тока в систему питания — кондуктивная связь по терминологии ЭМС- или индуцируя перенапряжения в цепях систем электроснабжения — радиационная связь по терминологии ЭМС.

В приложении F представлены примеры предотвращения перенапряжений и возникающие проблемы использования сигнальных методов ЭМС, которые не включают использование УЗИП.

10.3 Предотвращение непоправимого ущерба

Применение УЗИП направлено на предотвращение двух причин повреждений, вызванных амплитудой и энергией воздействующего импульса (включая продолжительность импульса), в то время как помеха обычно определяется передним фронтом импульса. Когда перенапряжение вызывается индуктивными эффектами, связанными с током импульса, крутизна переднего фронта импульса является определяющим фактором возникновения перенапряжения.

Предотвращение непоправимого ущерба может быть достигнуто повышением помехозащищенности оборудования. В МЭК 60664-1 определено несколько категорий оборудования по допустимым уровням напряжения.

Следует учесть то, что изоляция противостоит обычно повышенным напряжениям в режиме линия-земля (обычный режим), в то время как чувствительные электронные компоненты обычно присоединяются к системе линия-нейтраль (рассматривается как дифференциальный режим). Способы заземления нейтрали играют соответствующую роль в относительных уровнях воздействия импульсных перенапряжений в обычном режиме в противоположность дифференциальному режиму. Например, в системах TN, соединение защитного заземления нейтрали и зезмления на вводе предотвращают дальнейшее распространение импульсных перенапряжений, воздействующих на установку в обычных режимах. В ряде стандартов МЭК,

касающиеся импульсных воздействий, например МЭК 61000-4-5, устанавливают для испытаний на помехозащищенность условие, что уровень импульсного перенапряжения в обычном режиме должен быть выше, чем для дифференциального режима. Эта ситуация не возникает в системе TN, где перенапряжения обычно ниже по сравнению с системой ТТ из-за многократного заземления нейтрального проводника.

В МЭК 60664-1 устанавливается прямое отношение между допустимым импульсным напряжением оборудования и категорией по перенапряжению, присвоенной оборудованию. Это отношение не зависит от географического расположения оборудования в рассматриваемой установке.

Установление категорий оборудования по уровню защиты от перенапряжения позволяет осуществлять выбор оборудования в соответствии с определенным сроком службы и приемлемым возможным ущербом. Выбор оборудования с достаточно высоким значением защиты от импульсного напряжения позволяют обеспечить необходимый уровень изоляции всей установки, снижая вероятность отказов до приемлемого уровня, обеспечивая защиту от основного перенапряжения.

Более высокий уровень категории защиты от перенапряжения указывает, что оборудование лучше противостоит и обеспечивает более широкий выбор методов защиты от перенапряжения. Если нагрузки на ответвлениях имеют относительно высокий импеданс, то после прохождения переднего фронта, при преобладании характерных импедансов, грозовые перенапряжения существенно не затухают до точки ввода.

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.

10.4 Ущерб, связанный с прерыванием питания и повреждениями

В случае импульсных воздействий на установки и оборудование, не защищенном УЗИП, существует более высокая вероятность повреждения оборудования или перерывом в электроснабжении при срабатывании защитных устройств (например, выключателей дифференциального тока (ВДТ) установки). Четыре типа событий могут быть связаны с материальным ущербом:

a) ухудшение условий обслуживания или прерывание обслуживания: Нарушение условий ведения бизнеса. Ухудшение обслуживания может содержать качественный элемент, который приводит к финансовым убыткам. Например, где работа автоматизирована или компьютеризирована возврат к работе в ручном режиме может быть фактически невозможным;

b) потеря операций: Эта стоимость расходов из-за реального времени невозможности использования оборудования: компьютеров, устройств связи и информационных технологий, включая связанные потери операционных доходов и/или производительности труда. Критические системы, такие как аварийные службы, центральные информационные системы, и т.д. могут иметь очень большие прямые и косвенные издержки, связанные с потерей функционирования. Коммерческие предприятия теряют прямой доход в течение времени простоя. Ожидаемое время для ремонта и восстановления функционирования зависит от доступности ремонтного персонала, запчастей, процедур и информации;

c) восстановление или замена оборудования или средств: Эта стоимость складывается из расходов на физическое устранение повреждений, включая замену оборудования и прямые и косвенные издержки, связанные с восстановительными монтажными работами. Постепенное ухудшение состояния компонентов оборудования может также произойти при повторяющихся небольших импульсных воздействиях, которые вызывают на вид случайные отказы. Такие события не могут быть сразу связаны непосредственно с ударом молнии или коммутационным событием во время отказа. При таких совокупных эффектах могут увеличиться расходы на регламентное или профилактическое обслуживание;

d) повреждение оборудования или травмирование людей может потребовать использования аварийных служб, таких как пожарные, скорая помощи, полиция, и других, которые являются дополнительным расходом для фирмы, человека или общества. Отказ систем пожарной сигнализации и аварийных телекоммуникационных служб уменьшают эффективность и вероятность использования таких служб.

Материальный ущерб, вызванный прерыванием электроснабжения и отказами в работе оборудования, зависит от условий функционирования электроустановки, учитывающих сезон, в который это происходит, день недели (будний день или выходные), время начала и продолжительность нарушения, полное или частичное прерывание обслуживания.

Оценка ущерба состоит из затрат, которые были бы понесены в пределах различных категорий потерь (например, стоимость потерянного производства или продаж, стоимость неактивного труда, затраты перепланирования, затраты от повреждений, и т.д.).

Оценка ущерба может быть выражена посредством определения полной стоимости потерь от отключения электричества, равным значению производственных потерь с учетом затрат, связанных с отключением электричества, за минусом стоимости электричества за период отключения.

Значение производственных потерь равно ожидаемому доходу без отключения электричества.

Затраты, связанные с отключением электричества — затраты на оплату труда при остановленном производстве, затраты труда на перезапуск производства, материальные затраты на перезапуск производства, затраты на поврежденные материалы, затраты на поврежденные детали, стоимость повторной обработки материалов и стоимость, использования резервных источников питания).

Экономия, связанная с отключением электричества — затраты, которые отсутствуют из-за отключения электричества (заработная плата, неоплаченная рабочим, стоимость неиспользованного сырья, стоимость неиспользованного топлива и частичная стоимость поврежденного материала).

Интенсивность отказов УЗИП может быть сведена к минимуму, если они соответствуют МЭК 61643-1 и выбраны для применения в соответствии с МЭК 61643-12 согласно характеристикам сети и ожидаемых возмущающих воздействий, таких как короткие замыкания, временные перенапряжения (ВПН), и т.д.

При оценке последствий при отказах УЗИП следует рассмотреть несколько вариантов использования разъединителя УЗИП:

a) разъединитель УЗИП включен последовательно с УЗИП и размыкание разъединителя УЗИП отключает отказавший УЗИП из системы и поддерживает непрерывность питания нагрузки, хотя и без защиты;

b) разъединитель УЗИП включен последовательно между портами ввода и вывода УЗИП. Размыкание разъединителя УЗИП отключает отказавший УЗИП и нагрузку от схемы электропитания;

c) возможно использование двух УЗИП, включенных параллельно, каждый со своим отдельным разъединителем УЗИП: один из УЗИП перестанет работать и будет отключен, но второй будет поддерживать защиту, на время, позволяющее сделать замену. (Эта опция может быть использована при импульсных воздействиях, но не работает при ВПН).

Выбранный вариант зависит от назначения устройства, стоимости оборудования, оставленного незащищенным, и всеми связанными нематериальными активами. Следует учитывать условия координации защиты от сверхтока между характеристиками разъединителя УЗИП и отсечкой защиты от сверхтока, существующей в электроустановке.

Разъединитель УЗИП, встроенный или связанный с УЗИП в соответствии с этим, может сработать прежде, чем сработают защитные устройства от сверхтока установки. В этом случае, при отказе УЗИП рассматриваются варианты a), b) или c), описанные выше

- Разъединители УЗИП, установленные в соответствии с перечислениями a) и b), не обладают быстродействием, чтобы сработать раньше защитного устройства электроустановки. В этом случае, электропитание прерывается, когда УЗИП перестал работать. Дополнительные устройства, такие как автоматический выключатель с самовозвратом, могут быть использованы для решения этой проблемы, но в некоторых случаях разъединитель УЗИП, возможно, еще не разомкнутый, приводит к повторному разъединению защитного устройства установки.

Функционирование УЗИП в условиях различных режимах повреждений приведено в МЭК 61643-12.

11 Использование защиты от импульсных перенапряжений

11.1 Основные положения

Выбор способа обеспечения защиты от импульсных перенапряжений в конкретной электроустановке является либо решением владельца установки, либо в соответствии с установленными обязательными требованиями. При принятии решения выделяют два существенных момента.

Оценка потребности в защите в зависимости от типа установки, типа оборудования, его назначения с учетом оценки рисков от повреждений.

Компромисс в оценке между выбором защиты от существенного, но редкого прямого воздействия и защиты от менее существенного, но более частого косвенного воздействия. Последнее может вызывать наводку перенапряжений в цепях установки, при ударе молнии в установку СН или на некотором расстоянии от установки НН. Подобный выбор применим и к коммутационным перенапряжениям.

11.2 Построение системы электроснабжения

Прямым и индуцированным импульсным воздействиям от удара молнии на линиях электропередачи более подвержены воздушные линии, нежели подземные кабели. Однако нельзя считать, что подземные линии экранированны от воздействий. Кроме того, последствия прямого удара молнии в подземную линию, вероятно, приведут к непоправимому ущербу, а не к перекрытию изолятора воздушной линии, которое может быть отключено выключателями.

Воздушные линии, расположенные на возвышенностях, холмах или в горах более подвержены прямым ударам молнии, чем подобные линии, расположенные в долинах и низинах. Кроме того, невысокие воздушные линии экранируются от прямого удара молнии смежными более высокими объектами. Для примера, измеренные значения в сетях СН показывают, что число прямых ударов молнии в линию может быть существенно уменьшено, при условии, что эта линия окружена высокими деревьями.

Коэффициент в анализе рисков зависит от обоих факторов (топография: коэффициент может быть выше или ниже, чем 1; среда: коэффициент ниже, чем 1).

В случае применении системы электроснабжения, где питание подается потребителю по подземным кабелям, следует рассматривать два различных случая.

a) прямой удар молнии в здание. В этом случае только часть полного электрического тока молнии стекает на заземлитель здания. Остальная часть тока молнии выходит из здания через питающие кабели к другим зданиям той же самой системы питания НН (см. 5.7 настоящего стандарта).

b) прямой удар молнии в грунт близко к зданию. В этом случае кабели, идущие к другому зданию, могут быть проложены там, где прямой удар попадает в грунт. Следовательно частично электрические токи молнии пойдут вдоль внутренних проводников и/или экрана кабеля. Этот электрический ток будет вызывать разность потенциалов между рабочими проводниками и локальной землей.

Подземные кабели могут оказаться под воздействием прямо, удара молнии в землю особенно через их оболочку, которая создает путь для тока с более низким удельным сопротивлением по сравнению с грунтом, что приведет это импульсное воздействие к установке. Индуцированные импульсные воздействия на подземных кабелях существуют, но они имеют более низкою вероятность, чем для воздушных линий и они вообще незначительны по сравнению с воздействием от близко расположенного прямого удара молнии в землю. В этом случае подземные кабели должны учитываться при оценке степени риска.

Вероятность прямого удара молнии в фазные проводники или индуцированные перенапряжения в фазных проводниках не зависит от типа системы заземления, но величина перенапряжения зависит. Для той же самой плотности ударов молнии система ТТ подвергается перенапряжениям с амплитудой приблизительно в три раза больше чем в системе TN.

11.3 Типы электроустановок

Следует рассмотреть четыре типа установок. В первых трех типах:

- жилые здания;
- малые и средние коммерческие или промышленные предприятия;
- большие коммерческие или промышленные предприятия

финансовые затраты от отказа или от прерывания питания (см. 10.2) отличаются для каждого.

Четвертый тип это критические (опасные) установки, для которых возникают не только финансовые убытки, но также возможен ущерб здоровью и жизни людей и затраты на охрану окружающей среды.

Жилые здания: должно быть рассмотрено оборудование, такое как персональные компьютеры, аудио и видео системы, устройства электронного управления, и т.д. которое особенно чувствительно к перенапряжениям. Внимание должно быть также обращено на последствия, в дополнение к вопросам, касающимся воздействия на оборудование.

Малые и средние коммерческие или промышленные предприятия: в дополнение к отказу оборудования должны рассматриваться вопросы затрат при отключении электричества. Домашний бизнес рассматривается, как малое коммерческое предприятие.

Большие коммерческие или промышленные предприятия: рассматриваются те же самые параметры, как и в предыдущем перечислении, но количество и стоимость оборудования здесь намного больше. Кроме того, последствия более существенны и вес этого параметра тоже более важен.

Критические (опасные) установки: в дополнение к финансовым последствиям перенапряжение может представлять непосредственно опасность для жизни (больницы), косвенно представлять опасность для жизни (нефтехимический завод) и/или представлять экологические опасности (ядерная установка или нефтехимический завод).

11.4 Возникновение импульсных перенапряжений

Общая информация о возникновении грозовых и коммутационных перенапряжений была приведена в разделах 5 и 6 соответственно, дополнительные сведения приведены в приложении А.

Вероятность прямых ударов в здание, определяется умножением площади здания на плотность ударов молнии для данной местности. Эти параметры и вытекающие вычисления подробно рассмотрены в МЭК 623005-1. Вероятность прямых ударов молнии в воздушные линии определяется таким же образом. Площадь определяется как произведение тройной высоты опоры на длину линии. Вероятность индуцированных перенапряжений в линиях см. на рисунке 10.

Возникновение коммутационных перенапряжений рассмотрено в разделе 6, где подчеркнуто, что локальные условия могут изменяться в широком диапазоне. Приложение В дает более подробную информацию. Эти условия неточны, так как в них не учтены вопросы применения УЗИП в конкретных условиях.

Возникновение и значимость временных перенапряжений (ВПН) рассмотрена в разделе 7. УЗИП обычно не способно уменьшить ВПН, учитывая энергию рассеяния от источника питания. Поэтому, выбор УЗИП должен быть компромиссом между предполагаемым (и возможно ненужным) преимуществом низкого защитного уровня, но с риска повреждения от ВПН и защищенностью от ВПН, но на более высоком защитном уровне.

11.5 Разъединитель УЗИП

Поскольку нереально по экономическим и практическим причинам создать УЗИП, способный противостоять всем возможным сценариям перенапряжений, условие выбора должно быть сделано для редкого, но не невозможного отказа компонентов УЗИП. В качестве меры защиты против недопустимых последствий обычно используется разъединитель УЗИП, который выбирается в соответствии с характеристиками установки, как это рассмотрено в 10.4.

Есть три основных функции УЗИП, которые необходимо выполнить согласно МЭК 61643-12, чтобы разъединить УЗИП с системой питания НН в случае отказа УЗИП:

- тепловая защита;
- защита от короткого замыкания;
- защита от косвенного прикосновения.

Эти три функции связываются с различными режимами повреждения УЗИП и отражены в различных видах защиты цепей УЗИП. Единственный разъединитель УЗИП мог бы быть способным к выполнению этих трех функций или может потребоваться установка до трех разъединителей УЗИП, чтобы покрыть три функции. Некоторые другие функции разъединения могут быть необходимы, например, в ситуациях, где очень высокие временные перенапряжения, вероятно, произойдут.

Отключающие устройства могут быть встроены в УЗИП непосредственно или связаны с ним (последовательно в цепи питания или на ответвлении к УЗИП). Некоторые функции могут быть выполнены защитой на отключение системы, расположенной на определенном расстоянии от УЗИП. Выбор места установки УЗИП на ответвлении или в распределительной сети зависит от координации с другими защитными устройствами от сверхтока и от требований по обеспечению непрерывности питания независимо от срабатывания защиты от перенапряжения. Разъединитель УЗИП может быть обычным предохранителем, выключателем или ВДТ, или устройством, специально разработанным для данного применения. УЗИП должны соответствовать техническим требованиям и быть испытаны на соответствие стандарта МЭК 61643-1.

11.6 Оценка степени риска

Цель оценки степени риска состоит в том, чтобы оценить обеспечивает ли защита требуемую степень риска, если это так, то выбрать надлежащие меры защиты, чтобы обеспечить степень риска ниже данного значения, определенного как допустимый уровень риска. Следующие подпункты относятся к вопросам защиты от переходных перенапряжений из-за ударов молнии, непосредственно в здание или в землю вблизи здания или в подводящие линии электроснабжения (см. рисунки 1 и 2), а также коммутационные перенапряжения, происходящие в сетях электроснабжения или в установках потребителей.

11.6.1 Риск, связанный с ударом молнии

В зависимости от местных условий, типа и протяженности низковольтной системы электроснабжения, удар молнии в другие, рядом расположенные здания или сооружения, могут также вызывать перенапряжения подобной величины. Эти виды перенапряжений рассмотрены в подразделе 5.7, совместно с вероятностью их возникновения.

а) ток от прямых ударов молнии в здание, может влиять на электрические установки и оборудование, расположенное внутри здания. Этот эффект возникает за счет резистивной связи (например, из-за

соответствующего импеданса повторного заземлителя или сопротивления оболочки кабеля), или через индуктивную связь по замкнутым контурам, сформированных в установках или системам уравнивания потенциалов. Перенапряжения, возникающие за счет этих связей, могут вызвать:

- разряд между внутренними установками и металлическими частями с возникновением пожара в здании и/или его составляющих;
- отказ установок и оборудования, расположенного внутри здания.

b) ток разряда молнии на землю вблизи здания, может влиять на электрические установки и специальное оборудование через резистивную связь и через магнитное поле. Перенапряжения, возникающие за счет этих связей, могут вызвать отказ электронных систем, расположенных внутри здания.

c) удар молнии в, или около линии электроснабжения здания, может вызвать перенапряжения, которые проникают во внутренние установки и оборудование.

Прямой удар молнии в провода линии, может вызвать перенапряжения, которые могут инициировать разряд между внутренними установками и металлическими частями (в особенности в щите ввода в здание, при большой крутизне переднего фронта) с возникновением пожара в здании и/или составляющих.

Кроме того, перенапряжения при прямом ударе молнии в провода линии, могут вызвать отказ внутренних установок и оборудования.

Удар молнии рядом с линией, может вызвать перенапряжения, которые могут быть переданы на внутренние установки и могут вызвать отказ электрооборудования и электронного оборудования.

Оценка риска из-за удара молнии представлена в МЭК 62305-2 Согласно МЭК 62305-2 риск определяется как вероятностные годовые потери (людские и материальные) в здании из-за удара молнии. Воздействия рассматривают и для молнии, ударяющей непосредственно в здание и для ударов молнии рядом со зданием. Воздействия молнии, ударяющей непосредственно в линию, питающую здание или в землю в непосредственной близости от линии вызывают грозовые перенапряжения (наведенные перенапряжения), также рассматриваются в этом техническом отчете.

11.6.2 Риски, связанные с коммутационными перенапряжениями

Коммутационные перенапряжения могут произойти вне внутренних установок и быть переданы по линии электроснабжения, или они могут быть созданы в здании, когда установка включает оборудование, генерирующее эти перенапряжения.

Как рассмотрено в разделе 6, существует два типа коммутационных перенапряжений:

a) вторичные перенапряжения (намеренная работа выключателей, переключение конденсаторов). Они происходят довольно часто, инициируемые ручным или автоматическим вмешательством. Их частота возникновения колеблется от нескольких секунд (сварка) до нескольких в день (переключение конденсаторов). Параметры этих перенапряжений, так же как их потенциал воздействия на оборудование вообще известен или предсказуем на основании опыта. Обеспечение защиты в этом случае основано на детерминированном анализе и в этом случае нет необходимости в анализе рисков;

b) случайные перенапряжения (отключение повреждения и восстановление питания системы). Их частота возникновения, довольна низка и неизвестна, но статистические результаты, рассмотренные в разделе и в приложении В, дают некоторую информацию для анализа оценки степени риска. Их величина и воздействие на оборудование не определяется для конкретных установок. Поэтому, решение об обеспечении защиты, вероятно, будет нуждаться в анализе рисков.

11.6.3 Типы повреждений

Удар молнии может нанести ущерб в зависимости от характеристик здания, из которых самые важные:

- тип конструкции;
- состав и назначение;
- коммуникации и линии, подводимые к зданию;
- меры, принятые для того, чтобы ограничить риск.

Кроме того, повреждение может быть ограничено частью здания или может распространяться на все здание, и может даже включать окружающие здание или среду (например, химические или радиоактивные выбросы). Для практического применения оценки степени риска полезно различать типы повреждения, которые могут появиться, как последствие удара молнии. Следует различать четыре типа повреждений, а именно:

- потеря человеческой жизни;
- потеря коммунального обслуживания;
- потеря культурного наследия;
- экономические потери: здание, внутреннее оборудование и потеря функционирования.

Если один из первых трех типов риска присутствует, решение о принятии мер защиты не должно быть сделано по усмотрению разработчика. Это решение должно быть принято на основании сравнения для каждого типа риска из-за удара молнии с максимальным допустимым значением.

Если риск является исключительно экономическим, решение о принятии мер защиты может быть принято разработчиком на основе просто экономической целесообразности, путем сравнения ежегодной стоимости любой меры защиты с ежегодной стоимостью вероятного ущерба из-за удара молнии, принимая во внимание не только ущерб нанесенный зданию и его внутреннему оборудованию, но также и последствия (например, потерю функционирования).

11.6.4 Критерии для оценки степени риска

Для оценки риска требуются следующие данные:

- плотность ударов молнии в данной области, где расположены линии и здания;
- тип, характеристики и длина линии (воздушная или, проложенная в земле; СН или НН);
- характеристики системы электроснабжения; тип и характеристики составляющих элементов;
- тип внутренних установок;
- характеристики оборудования (уровень защиты от импульсных перенапряжений);
- меры защиты, принятые против перенапряжений;
- противопожарные мероприятия;
- стоимость повреждения оборудования;
- количество последующих потерь, социальные последствия и воздействие на окружающую среду в результате повреждения;
- меры, по ограничению последствий повреждения оборудования (например, резервирование мощности системы электроснабжения, резервная линия электроснабжения, и т.д.).

11.7 Выводы о необходимости защиты от перенапряжений

Потребность в защите от перенапряжений определяется как объективными, так и субъективными факторами. Объективные факторы могут быть выражены посредством оценки степени риска, но, в конечном счете, выбирается то, что соответствует субъективной оценке допустимого риска. Во многих случаях, фактическое решение по обеспечению защиты от перенапряжений может оказаться не лучшим из-за нормативных требований, установленных конечным потребителем.

В большинстве случаев, коммутационные перенапряжения менее разрушительны, чем грозовые перенапряжения и средства защиты (а именно, УЗИП) эффективные при защите от импульсных воздействий молнии также эффективны от коммутационных импульсных воздействий. Поэтому, защита от коммутационных импульсных воздействий, которая требуется в большинстве случаев, рассматривается только при отсутствии защиты от импульсных воздействий молнии.

12 Применение защиты от импульсных перенапряжений

12.1 Основные положения

Большинство грозовых перенапряжений в пределах установки вызывается удаленными ударами молнии в землю. Возникающие импульсные воздействия обычно незначительны и низкоэнергетическая защитная характеристика устройства (УЗИП) достаточна для защиты от этих умеренных воздействий. Если рассматривается защита от прямого или нанесенного в непосредственной близости удара молнии, то необходимо применение высокоэнергетического УЗИП, чтобы противодействовать более серьезным воздействиям. Рекомендуется проводить оценку вероятности этих различных воздействий, включая их материальные и нематериальные последствия.

Рассматривая воздействие молнии, на кабели или провода некоторой длины указывается, что в случае крутого переднего фронта высокие напряжения возникают на том конце кабеля, на котором вводится ток. Эти перенапряжения могут превысить допустимые напряжения для электропроводок и оборудования, приводя к пробоям. Следовательно, УЗИП, установленный на другом конце кабеля, не подвергаются существенным воздействиям, связанным с инжекцией импульсных воздействий с большой амплитудой и большой продолжительностью при большой крутизне переднего фронта.

Если рассматриваются воздействия, вызванные прямым или нанесенным в непосредственной близости ударом молнии, то эти воздействия являются определяющими для энергетических требований к УЗИП. Классификация соответствующих устройства и их оптимальная точка присоединения рассматриваются в следующих подпунктах. Они включают общее описание УЗИП, отношения между основными

характеристиками и требованиями, предъявляемыми к УЗИП, оценки эффективности применения УЗИП, вопросы координации между УЗИП и совместимости с другими защитными средствами. См. также приложение F, где приведены примеры управления перенапряжением, выполненного сигнальными методами ЭМС, а не устройствами защиты от импульсных перенапряжений.

12.2 Защитные устройства от импульсных перенапряжений в системах электроснабжения

12.2.1 Функции УЗИП

В настоящем стандарте рассматриваются УЗИП, установленные вне защищаемого оборудования. При нормальных условиях УЗИП не оказывает существенного влияния на эксплуатационные характеристики систем, в которых они применяются. При аварийных условиях (возникновение импульсного перенапряжения), УЗИП реагирует на импульсное перенапряжение, снижая свой импеданс и таким образом принимая импульсный ток на себя, чтобы ограничить напряжение на его защитном уровне. После возврата к нормальным условиям, УЗИП восстанавливает высокий импеданс после того как проходит импульсное перенапряжение и ток в нагрузке. Подробная информация о нормальных условиях и требованиях приведены в стандартах на УЗИП серии МЭК 61643.

УЗИП может выйти из строя или быть разрушенным, если энергия импульсного воздействия превосходит допустимую энергию и ток для УЗИП. Режимы отказа УЗИП проявляются примерно поровну в виде обрыва цепи и замыкания. Для режима обрыва цепи защищаемая система теряет защиту. В этом случае, отказ УЗИП обычно трудно обнаружить, потому что это событие не оказывает почти никакого действия на систему. Может потребоваться гарантия замены отказавшего УЗИП перед следующим импульсным перенапряжением с помощью устройства указания отказа УЗИП. В режиме замыкания отказавшее УЗИП существенно влияет на систему. Ток короткого замыкания от источника питания течет через отказавшее УЗИП. Выделяемая тепловая энергия может привести к возгоранию за время до перегорания и размыкания цепи.

В случае, если в системе нет никакого специального устройства для разъединения отказавшего УЗИП от цепи, может потребоваться специальное дополнительное отключающее устройство для УЗИП для отключения при коротком замыкании цепи.

Примечание — В этом подпункте, используется термин "режим замыкания". Если бы короткое замыкание происходило с нулевым импедансом, то ситуация была бы менее трудной, чем это для типового ограничивающего напряжение УЗИП, где в так называемом "режиме замыкания" происходит существенное снижение, но не обнуление импеданса. В отказавшем УЗИП может быть достаточное остаточное сопротивление чтобы ограничить ток значением, которое могло бы или не могло бы вызвать срабатывание защитного устройства от сверхтока. Даже если сверхток такой, что защитное устройство действительно им управляет, его ответ во времени, может быть таким, что в остаточном сопротивлении отказавшего УЗИП выделится существенное тепло в ограниченном пространстве, что может привести к существенному повышению температуры.

12.2.2 Классификация УЗИП

Стандарты на УЗИП определяют классификационные характеристики, такие как:

- число портов: один или два;
- топология изделия: коммутация напряжения, ограничение напряжения или их комбинация;
- испытательный класс I, II и III (см. МЭК 61643-1);
- расположение: встроенный или наружный;
- доступность: доступный, недоступный;
- метод монтажа: стационарный или переносной;
- разъединитель УЗИП: расположение и функция;
- защита от сверхтока: есть или нет;
- степень защиты, обеспечиваемая оболочкой УЗИП.

Вышеупомянутые варианты фактически связаны с технологией и определяются изготовителем. Основные компоненты УЗИП делятся на две категории:

- ограничивающие напряжение компоненты: варисторы, лавинные или пороговые диоды, и т.д.;
- коммутирующий напряжение компонент: разрывы в воздухе, газовых разрядных трубках, управляемый кремниевый выпрямитель, и т.д.

Основанные на этих компонентах, основные конструкции УЗИП:

- единственный компонент, ограничивающий напряжение: тип ограничивающий УЗИП;
- единственный компонент, коммутирующий напряжение: тип коммутирующий УЗИП;
- комбинация различных технологий: тип комбинированный УЗИП.

Множество конструкций УЗИП не определяются простым сочетанием основных компонентов. Они могут включать индикаторы, отключающие устройства, предохранители, дроссели, конденсаторы и т.п. Другой способ описания УЗИП состоит в том, что могут использоваться однопортовый УЗИП, УЗИП с двумя портами, или комбинация многопортовых УЗИП, как указано в разделе 3.

12.2.3 Электрические характеристики УЗИП

Выбор УЗИП определяется следующими характеристиками, установленными в стандартах на УЗИП серии МЭК 61643:

- максимальное действующее значение напряжения и тока;
- зависимость временного перенапряжения от времени;
- номинальный ток разряда (только для испытаний по классу I и классу II);
- I_{max} для испытаний по классу II и I_{imp} для испытаний по классу I;
- U_{oc} для испытаний по классу III;
- U_P уровень напряжения защиты;
- срок службы;
- надежность;
- защита от короткого замыкания;
- максимальный длительный ток нагрузки (для УЗИП с двумя портами или однопортовых, соединенных последовательно с сетью);
- диапазон напряжения (для УЗИП с двумя портами).

12.3 Основные характеристики системы для выбора УЗИП

Этот подраздел дает представление об общих принципах по применению УЗИП для защиты системы электроснабжения. Дополнительные сведения приведены в приложении Е.

12.3.1 Защищаемые системы и оборудование

Кроме номинального напряжения системы, одним из параметров для характеристики системы электроснабжения является тип заземления системы (TN-C, TN-S, TN-C-S, TT, IT). Все рассматриваемые электрические установки могут быть сгруппированы по четырем главным категориям:

- защищаемая установка, включая специальное оборудование, защищена от перенапряжений, по крайней мере, гальваническим разделением и выбором соответствующих кабельных соединений;
- переносное оборудование в обычном исполнении (бытовое обслуживание и легкая промышленность);
- оборудование для стационарных электрических установок в обычном исполнении (бытовое обслуживание и легкая промышленность);
- специальные условия, где возникновение одного или более повреждений маловероятны, но где существуют некоторые ожидания касающиеся непрерывности электроснабжения. Примеры таких случаев это тяжелая промышленность и вводные устройства электрических установок зданий, с точки зрения импульсных перенапряжений.

На оборудование, служащее частью полной электрической системы, импульсные перенапряжения и токи влияют по-разному. Среди основных характеристик, которые рассматриваются это:

- диэлектрическая проницаемость изоляции;
- стойкость к электромагнитным воздействиям.

Воздействия на изоляцию могут вызвать ее отказ, который может привести к нанесению ущерба, такого как пробой изоляции на землю, короткие замыкания, повреждение оборудования, возгорание и т.д. С точки зрения обеспечения безопасности требуется, чтобы все оборудование имело по крайней мере минимальный уровень защиты от таких воздействий. Эта проблема подробно рассматривается в стандарте МЭК 60664-1: методы испытаний основываются на стандартном 1,2/50 мкс импульсе напряжения. Однако импеданс генератора, который будет использоваться, не определяется в МЭК 60664-1, который может привести к различным результатам для оборудования, в зависимости от их импеданса.

Электромагнитные воздействия обычно приводят к неправильному функционированию, потере хранивших данных или даже повреждению электронных компонентов. Минимальный уровень защиты от многих электромагнитных воздействий необходим для надлежащего функционирования оборудования. Эта помехозащищенность определяется в соответствии с серией стандартов по ЭМС посредством соответствующих методов испытаний для различных типов воздействий.

Уровни помехозащищенности, которые рассматриваются в стандартах по ЭМС, используются в технических комитетах по соответствующим изделиям. Технические комитеты выбирают соответствующий уровень помехозащищенности согласно намеченному использованию изделия и условий окружающей среды. Руководство для типовых электромагнитных сред приведено в МЭК 61000-2-5.

12.3.2 Выбор УЗИП в соответствии с воздействиями

12.3.2.1 Грозовые перенапряжения и сверхтоки

В большинстве случаев грозовые перенапряжения являются основополагающими для определения энергетических требований к УЗИП. Знание о форме тока молнии (или напряжения) и его амплитуде необходимо для определения воздействия (энергетическое смещение) приложенного к УЗИП и убедиться, что требуемый уровень защиты УЗИП по напряжению достигается. Уровни грозовой активности, которые рассматриваются в подразделе 5.2 определяются характером месторасположения. Однако этот критерий грозовой активности не очень подходит для того, чтобы решить, использовать УЗИП или нет. Лучший критерий — это плотность ударов молнии от облака к земле (число ударов молнии на 1 км^2 в год). Современные системы обнаружения молнии могут предоставить такую информацию с достаточной точностью.

В некоторых определенных ситуациях, даже если питание обеспечивается подземным кабелем, использование УЗИП может быть рекомендовано для обеспечения защиты установки. Это происходит когда:

- данное здание или другие здания, расположенные в непосредственной близости подвергаются прямым ударам молнии;
- длина кабеля не достаточна, чтобы обеспечить соответствующее разделение (затухание) установки от питающей части сети;
- ожидаются высокие импульсные воздействия атмосферного электричества на воздушных линиях на стороне СН трансформатора, соединенного с установкой;
- на подземный кабель может воздействовать прямой удар молнии при высоком удельном сопротивлении грунта;
- размер или высота здания, при питании кабелем, являются достаточно большими, что значительно увеличивает риск прямого удара молнии в здание.

Риск прямого удара молнии в другие входящие или исходящие коммуникации (телефонные линии, антенные системы, и т.д.), который может влиять на систему электроснабжения, также должен быть рассмотрен.

Примечание 1 — В МЭК 60364-4-44 установлено, что если электроустановка питается подземным кабелем или если она питается от воздушной линии при незначительной грозовой активности, то нет необходимости в использовании УЗИП, если степень риска в зависимости от использования установки исключительно низок. Однако, даже при условии, что питание осуществляется подземным кабелем, это не всегда достаточно для обеспечения защиты установки особенно в случаях прямого и произошедшего в непосредственной близости удара молнии, которые не рассматриваются в МЭК 60364-4-44. Поэтому факт питания подземным кабелем не может рассматриваться как единственное основание при определении потребности в установке УЗИП. Кроме того, изменение величины импульсных перенапряжений, происходящих в воздушных линиях, зависят как от уровня грозовой активности, так и от конфигурации линии, периода года, и так далее. Поэтому значение 25 для уровня грозовой активности не может рассматриваться как единственное основание при определении потребности в установке УЗИП. Анализ степени риска должен быть выполнен. Этот анализ должен быть основан на вероятности возникновения импульсных перенапряжений и экономического баланса между защитой и последствиями.

Примечание 2 — Если несколько зданий получают питание от одной распределительной сети, то рекомендуется устанавливать УЗИП для каждого из этих зданий.

С целью оценки тока, проходящего через УЗИП в случае прямого удара молнии в здание, оборудованного внешней системой защиты от молнии, достаточно учесть сопротивление заземления, например, заземления здания, труб, заземления системы электроснабжения, и т.д. На рис. 24 приведен типовой пример распределения токов.

Примечание 3 — Импульсный ток молнии определяется двумя основными параметрами. Первым является скорость нарастания, которая определяет индуцированные напряжения. Вторым является его продолжительность, которая по существу определяет величину энергии разряда. Высокочастотные эффекты отсутствуют в этот более поздний период, позволяя оценить сопротивление, которое будет использоваться для вычисления распределения токов.

Если точная оценка (например, вычислением, как проиллюстрировано в п.5.7.1 и в приложении А) не возможна, то можно принять, что 50 % полного тока молнии I уходят в землю. Другие 50 % тока распределяются среди коммуникаций, вводящих в здание, таких как: сторонние проводящие части, электрические и коммуникационные линии, и т.д. согласно соотношению импеданса заземления этих коммуникаций. На рисунке 24 принято, что три вида коммуникаций имеют равный импеданс заземления.

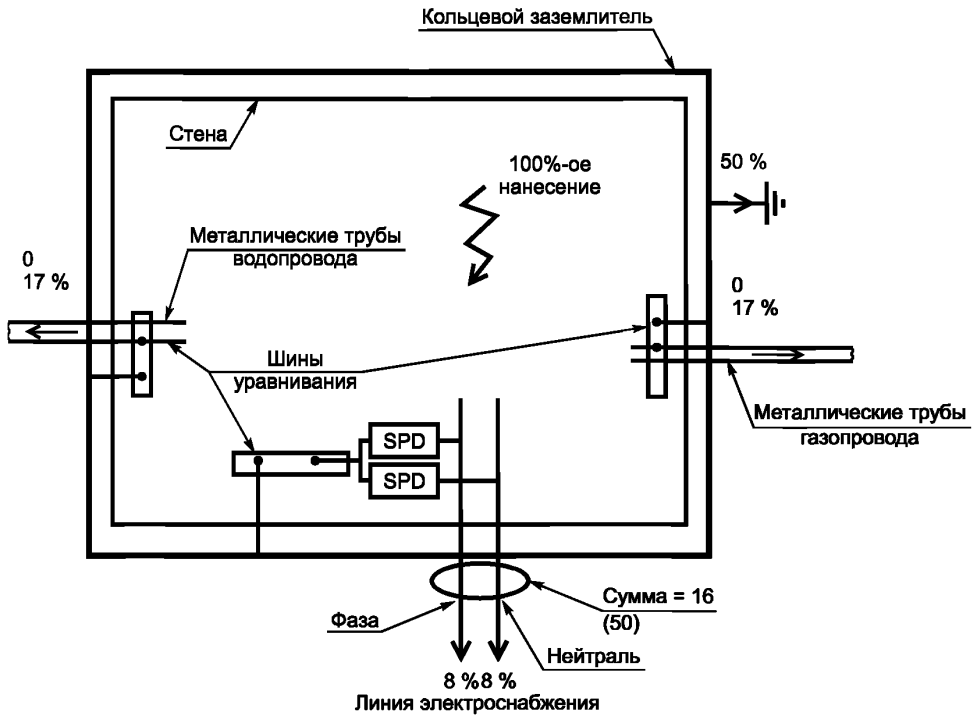


Рисунок 24 — Пример проникновения тока молнии во внешние коммуникации (система ТТ)

Если питающие или коммуникационные кабели имеют экран, то оба конца соединяются с землей непосредственно или через УЗИП. В этом случае, часть тока молнии, который переносит этот кабель, будет течь по экрану, так же как и через внутренние проводники. Распределение токов между проводниками зависит от конструкции кабеля, а так же от параметров импульсного перенапряжения. Во всех случаях, УЗИП должен быть установлен как можно ближе к клемме заземления экрана.

12.3.2.2 Коммутационные перенапряжения

Коммутационные перенапряжения с точки зрения энергии и напряжения обычно ниже, чем воздействия при ударе молнии. Однако в некоторых случаях, особенно в глубине здания или вблизи источника коммутационных перенапряжений, коммутационное перенапряжение может быть выше чем то, которое вызвано ударом молнии. Необходимо знать энергетические характеристики коммутационных перенапряжений для выбора соответствующего УЗИП. Длительность коммутационных перенапряжений, включая переходные процессы при повреждениях, срабатываниях предохранителя, переключения конденсаторов могут быть существенно длиннее, чем продолжительность воздействия при ударе молнии, в связи с чем трудно определить обычно применимые параметры.

12.3.2.3 Временные перенапряжения (ВПН)

УЗИП может подвергаться временным перенапряжениям (ВПН) во время его работы, когда напряжение превышает его максимальное длительное рабочее напряжение. Воздействие ВПН на УЗИП определяется двумя параметрами, величиной и временем воздействия:

a) при определении величины максимума ВПН, которое может возникнуть в системе, должны рассматриваться следующие факторы:

- рабочее напряжение системы электроснабжения НН;
- конфигурация системы электроснабжения НН (однофазная, трехфазная, и т.д.);
- количество заземлителей;
- связь через заземлитель с системой электроснабжения СН;
- связь систем СН и НН.

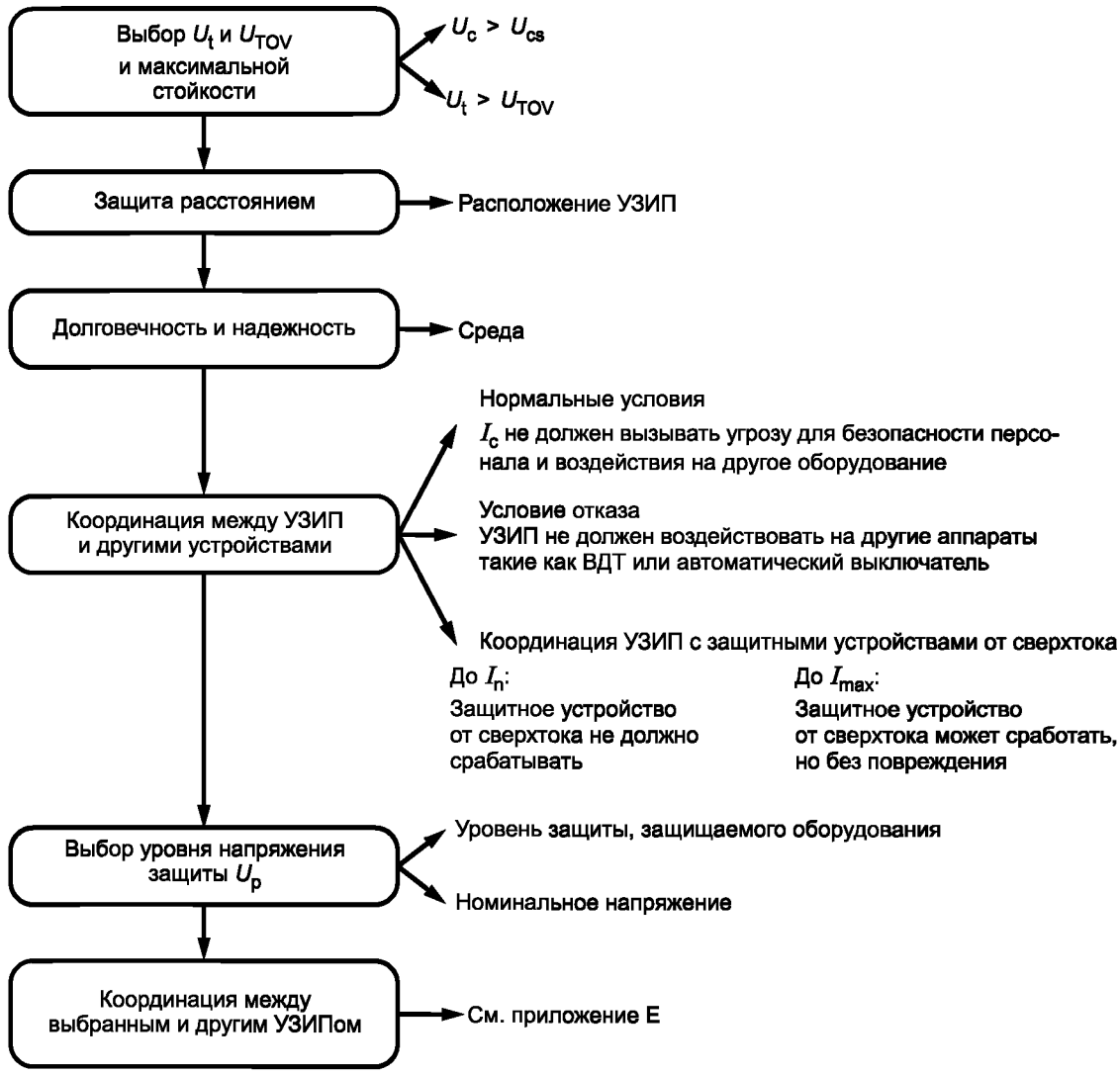
b) при определении времени воздействия ВПН, которое может произойти в системе, должны рассматриваться следующие факторы:

- месторасположение точки повреждения (система электроснабжения СН/НН или установка НН);
- защитные устройства для отключения повреждения.

Дополнительные факторы могут быть важными, например, в случаях соседства с опорами линий ВН или с железнодорожными путями.

12.3.3 Этапы при выборе УЗИП

Выбор подходящего УЗИП требует нескольких шагов, как показано на рисунке 25. Детали этих соображений даются в приложении Е. Завершающим шагом в процедуре, является координация между выбранным и другим УЗИП, рассмотренными в подразделе 12.5, с дополнительной информацией в приложении Е.



U_c Максимальное действующее рабочее напряжение УЗИП
U_{cs} Максимальное действующее рабочее напряжение системы
U_t Временное перенапряжение УЗИП
U_{TOV} Временное перенапряжение системы
I_n Номинальный ток разряда
I_{max} Максимальный ток разряда
I_c Ток нагрузки

Рисунок 25 — Соображения при выборе УЗИП

12.4 Соображения по установке УЗИП

12.4.1 Возможные режимы защиты

Когда у защищаемого оборудования достаточно высокая защищенность от перенапряжения, или когда оно расположено вблизи от вводного устройства, может быть достаточным применение единственного УЗИП. В этом случае, УЗИП должен быть установлен как можно ближе к точке ввода и иметь достаточ-

ный уровень защиты от импульсных перенапряжений. Типовые примеры даются в приложении Е. В таблице 7 приведен перечень пар проводников системы электроснабжения, между которыми включаются УЗИП для конкретной установки. Однако не все режимы защиты необходимы. Выбор зависит от нескольких факторов, таких как:

- тип оборудования, которое будет защищено (например, если определенное устройство не имеет заземления, то защита линия- земля или нейтраль- земля не требуется);
- уровень защиты оборудования в различных режимах;
- система электроснабжения в соответствии с указаниями таблицы и способах заземления;
- наконец, что не менее важно, характеристики воздействующего импульсного перенапряжения, в той степени, в которой они могут быть определены.

Установка УЗИП на стороне системы электроснабжения перед точкой ввода в установку потребителя или перед точкой раздела между электроснабжающей организации и потребителем, должна быть выполнена с согласия электроснабжающей организации , или возможно, самой электроснабжающей организацией.

Таблица 7 — Возможные режимы защиты

УЗИП установлен между:	Тип системы питания			
	ТТ	TN-C	TN-S	IT
Линией и нейтралью	X		X	X[a]
Линией и PE	X		X	X
Линией и PEN		X		
Нейтралью и PE	X		X	X[a]
Линия и линия	X	X	X	X
При распределительной нейтрали.				

Должны быть приняты соответствующие меры, чтобы ограничить индуктивную связь между незащищенными и защищенными частями установки. Взаимная индуктивность может быть уменьшена разделением между цепями электроснабжения потребителя, ограничением площади замкнутых контуров и шага скрутки. В общем случае, лучше отделить защищенные провода от тех, которые не защищаются. В дополнение, требуется отделение от заземляющего проводника. Во всех случаях должны быть приняты меры для избегания перекрестной связи возмущений между коммуникационными кабелями и питанием.

12.4.2 Влияние колебаний или отраженных волн на защитном расстоянии

Когда УЗИП используется, чтобы защитить определенное оборудование или когда УЗИП расположенное на вводе не может обеспечить достаточный уровень защиты для некоторого оборудования, УЗИП должен быть установлен как можно ближе к защищаемому оборудованию. Если это расстояние является слишком большим, колебания или отраженные волны могут привести к напряжениям на вводе оборудования выше, чем уровень защиты, обеспечиваемый УЗИП. Эта ситуация может вызвать повреждение защищаемого оборудования, несмотря на наличие УЗИП. Допустимое расстояние (названное защитным расстоянием) зависит от типа УЗИП, типа системы, крутизны и формы волны входящего импульса и подключенных нагрузок. Колебания с собственной частотой цепи могут быть вызваны ступенчатой функцией воздействующего импульсного перенапряжения. Отражения в конце ответвленной цепи происходят в соответствии с классической теорией линии электропередачи, включающей отношение между импедансом линии и оконечным (нагрузки) импедансом.

В частности удвоение напряжения возможно только, если оборудование имеет очень высокий импеданс нагрузки или если оборудование разъединяется внутри. Вообще, колебания или отражения могут быть проигнорированы при расстояниях меньше чем 10 м. Иногда оборудование имеет внутренние защитные компоненты, такие как варисторы, которые значительно уменьшают колебания и отражения даже на более дальних расстояниях. В этом случае, необходимо принять меры, чтобы избежать возникновения проблем по координации между УЗИП и защитным компонентом в оборудовании.

Примечание — Защита путем установки УЗИП вблизи защищаемого оборудования обычно недостаточна. По причинам ЭМС лучше отвести ток импульсного воздействия непосредственно на вводе в здание, чтобы

избежать электромагнитных возмущений из-за токов импульсных воздействий. Кроме того, чтобы защитить установку (избежать пробоя между проводниками), УЗИП также лучше установить на вводе установки. В случае необходимости, другой УЗИП устанавливается вблизи оборудования, если оборудование находится не в пределах защитного расстояния УЗИП, установленного на вводе. В этом случае должна быть проведена проверка на координацию, как указано в подразделе 12.5.

12.4.3 Влияние проводников присоединения УЗИП

Примечание — Пример, представленный на этом рисунке, с типовой стандартной импульсной волной, d//df является самым высоким в начале импульса. В случае импульсов молнии самый высокий d//df может быть близок к амплитудному значению. Этот комментарий, однако, не уменьшает важность обеспечения оптимальной основной конфигурации.

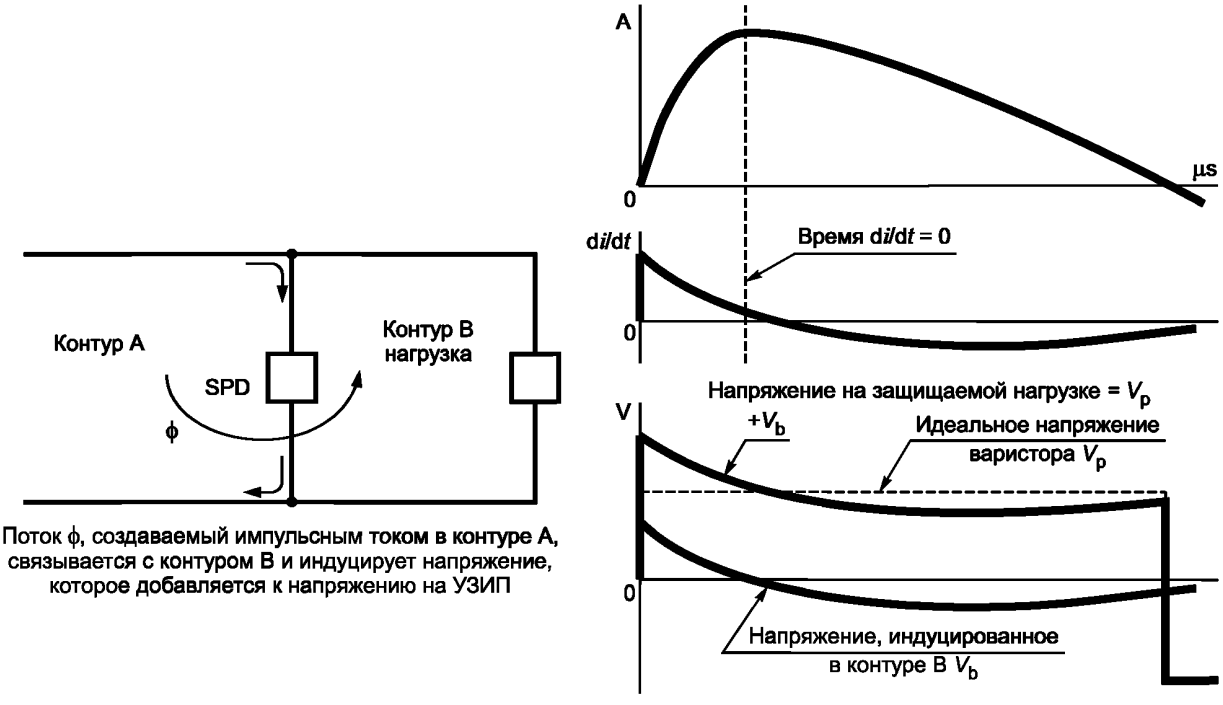


Рисунок 26 — Эффект увеличения напряжения на варисторе от соединительных проводов

12.5 Координация между УЗИП и защищаемым оборудованием

Когда два или более УЗИП присутствуют в установке, будет возникать взаимное воздействие УЗИП, и если они не выбраны должным образом, есть риск перенапряжения на менее мощном защитном устройстве. В принципе, УЗИП с более низким защитным уровнем будет иметь тенденцию принять более высокий ток, из-за более низкого эффективного импеданса. Однако при размещении УЗИП в той части установки, в которой импульс сгенерирован, крутизна импульса и его продолжительность, так же как импеданс между УЗИП является существенными факторами при оценке токового и энергетического воздействий.

Для объяснения этого явление и иллюстрации влияния тока пробоя так же как импеданса между УЗИП (включая отключающиеся элементы), в разделах Е.1, Е.2 и Е.3 приложений приведены вычисления для упрощенного случая.

12.5.1 Общая цель координации

Всякий раз, когда для защиты оборудования используется больше чем одно УЗИП, и после проверки того что уровень защиты УЗИП и их размещение является подходящим для защищаемого оборудования, необходимо исследование координации этих УЗИП и оборудования. Общая цель координация это уменьшить перенапряжения, посредством УЗИП, до уровня допустимого для защищаемого оборудования, и гарантии того, что не будет превышено допустимое импульсное перенапряжение на УЗИП. Это условие может быть выражено следующим образом.

Для двух УЗИП, соединенных параллельно, УЗИП1 и УЗИП2, разделенных импедансом (рисунок 27), энергетическая координация достигается если, для каждого импульсного перенапряжения и пробоя, которые рассматриваются, часть энергии, рассеянной в УЗИП, меньше или равна, максимально-допустимой энергии рассеяния УЗИП2.

Координация между двумя УЗИП может демонстрироваться пятью разными подходами, описанными ниже. Безотносительно подхода необходимо, чтобы конечный потребитель определял выбор УЗИП, предпочтительно обоих. Если один уже выбран и находится вне управления конечного потребителя, должна оцениваться координация второго УЗИП и, в случае необходимости, должен выбираться наиболее подходящий УЗИП. В большинстве случаев осуществление координации является или кажется сложной задачей. Некоторые из следующих пяти подходов трудны в применении конечным потребителем, из-за отсутствия некоторых данных, например, точных характеристик УЗИП. Однако, координация необходима, чтобы гарантировать технически эффективное и рентабельное использование ресурсов.

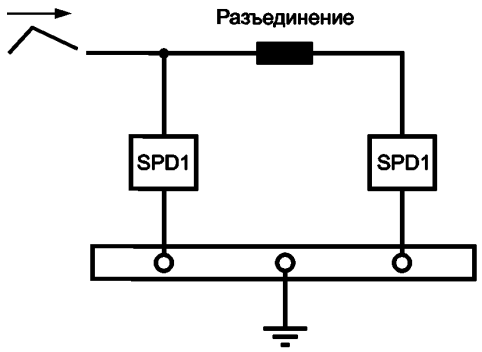


Рисунок 27

12.5.2 Оценка координации

Пять основных различных способов оценки координации двух УЗИП:

a) использование рекомендованных комбинаций УЗИП.

Для пользователей это самая удобная разновидность, так как вся ответственность переносится на изготовителя УЗИП. Однако этот подход подразумевает, что в основе данных изготовителя лежат общепринятые стандартные методы, и должна быть уверенность, что устройства от разных изготовителей фактически эквивалентны;

b) вычисление координации.

Посредством компьютерного моделирования сложные системы могут быть исследованы и параметрические оценки выполнены в широком диапазоне;

c) допустимость применения согласно энергетической концепции

В этой концепции некоторый разъединяющийся импеданс постулируется для входного УЗИП и вычисление выполняется так, чтобы преобразовать характеристики УЗИП на основе эквивалентного генератора комбинированной волны. Тогда может быть сделано сравнение с допустимой энергией для выходного УЗИП [27]. Этот метод описывается более подробно в разделе Е.8 (см. таблицы Е.5 и Е.6);

d) испытание на координацию

Полномасштабные испытания выполняются для выбираемого УЗИП, для заданного импеданса разъединения и диапазона токов импульсного воздействия так, чтобы были определены все мертвые зоны, если таковые вообще имеются. Испытуемые устройства могут включать ограничивающий напряжение УЗИП, коммутирующий напряжение УЗИП, или комбинированный УЗИП (коммутирующий напряжение УЗИП + ограничивающий напряжение УЗИП);

e) упрощенные табличные методы.

Могут использоваться упрощенные таблицы, включающие данные для координации некоторого типового УЗИП когда никакие другие данные не известны от изготовителей УЗИП. Значения, данные в этих таблицах основаны на достаточном объеме данных, чтобы покрыть несоответствия между разными изготовителями и с учетом производственных допусков. Примеры таких таблиц даются в приложении Е.

12.6 Выводы по применению защиты от импульсных перенапряжений

Для успешного применения УЗИП требуется рассмотрение многих факторов, которые были кратко описаны в этом разделе. Доступно к применению множество типов УЗИП, так, что всегда возможно выбрать тип, который соответствует параметрам импульсного перенапряжения, при котором устройство должно выполнить свою защитную функцию. Этот процесс выбора включает несколько этапов, на которых оцениваются характеристики выбираемого УЗИП:

- координация максимально действующего значения напряжения системы и УЗИП;
- координация временного перенапряжения системы и УЗИП;
- координация допустимой импульсной характеристики УЗИП с импульсным воздействием в точке использования;
- координация уровня защиты УЗИП и допустимого уровня защищенности от импульсных воздействий для защищаемого оборудования;
- рассмотрение последствия (режим повреждения) для редкого случая чрезмерного напряжения;
- обеспечение отсутствия нежелательных побочных эффектов при нормальной или аварийной работе системы электроснабжения;
- координацию реакции УЗИП на импульсные воздействия с работой защитного устройства от сверхтока;
- координация работы выбираемого УЗИП с другими УЗИП в установке;
- гарантия того, что топология и размеры соединений не ухудшают работоспособность УЗИП.

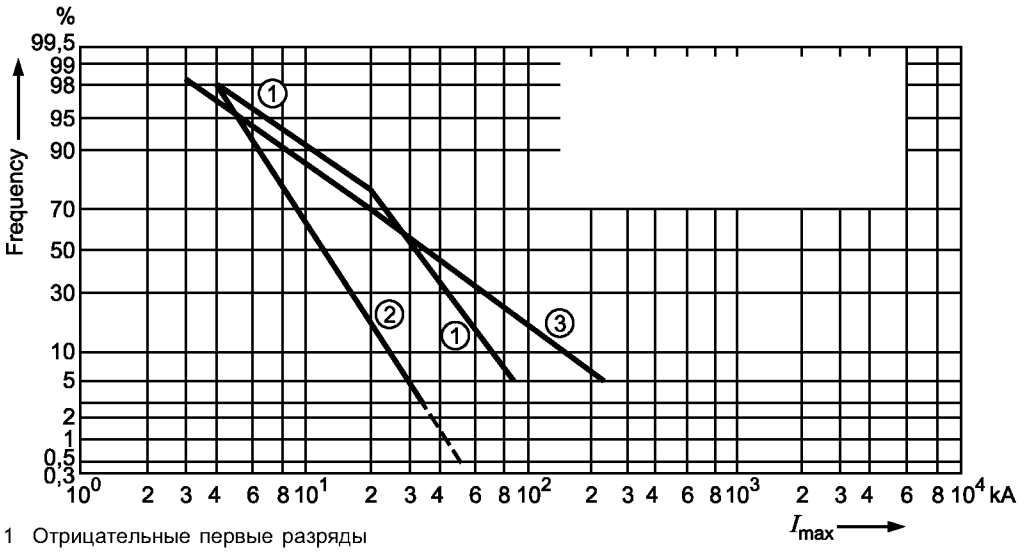
Приложение А
(справочное)

Дополнительная информация о грозовых перенапряжениях

А.1 Дополнительные данные о параметрах молнии

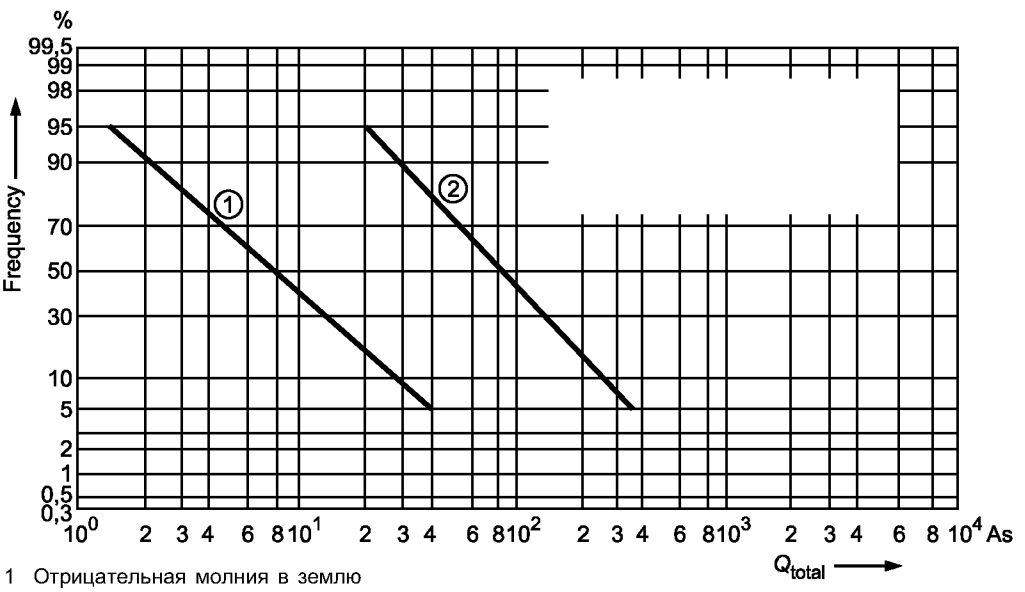
В таблице 2 раздела 5 приведены некоторые данные о параметрах разряда молнии. Другие соотношения для этих параметров приведены в МЭК 61312-1 в графической форме в виде частоты распределения для следующих параметров:

- достижение максимума тока I_{max} (рисунок А.1);
- полный заряд Q_{total} (рисунок А.2);
- переходный заряд Q_{trans} (рисунок А.3);
- энергетия ***W/R*** (рисунок А.4);
- максимальная производная переходного тока $(d_i/d_t)_{max}$ (рисунок А.5);
- производная переходного тока $(d_i/d_t)_{30/90\ \%}$ отрицательных последующих разрядов (рисунок А.6).



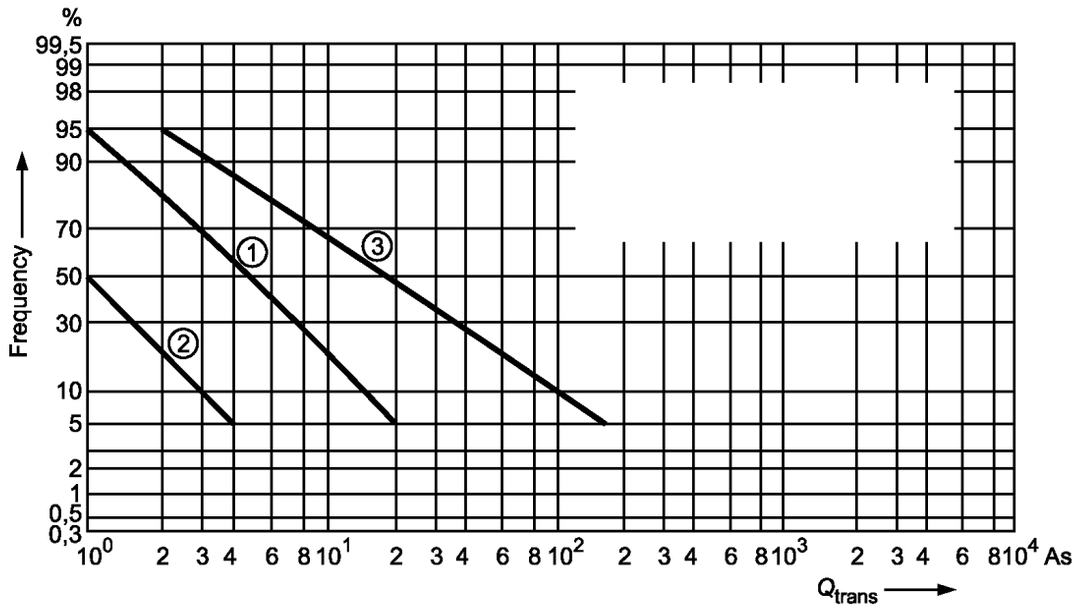
1 Отрицательные первые разряды
2 Отрицательные последующие разряды
3 Положительно заряженная земля

Рисунок А.1 — Частотное распределение максимального тока молнии I_{max}



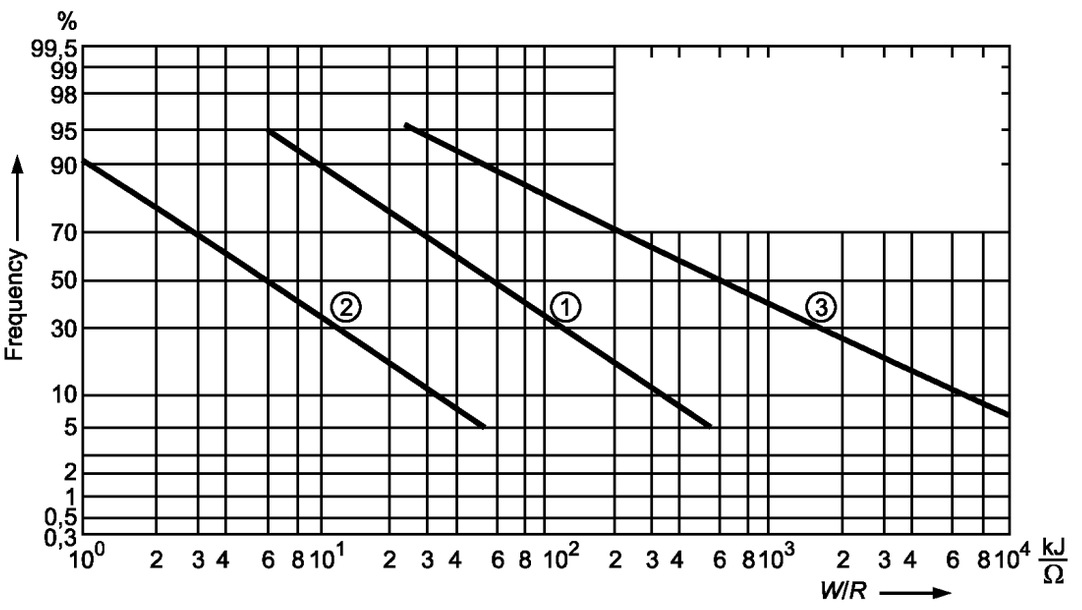
1 Отрицательная молния в землю
2 Положительная молния в землю

Рисунок А.2 — Частотное распределение полного заряда молнии Q_{total}



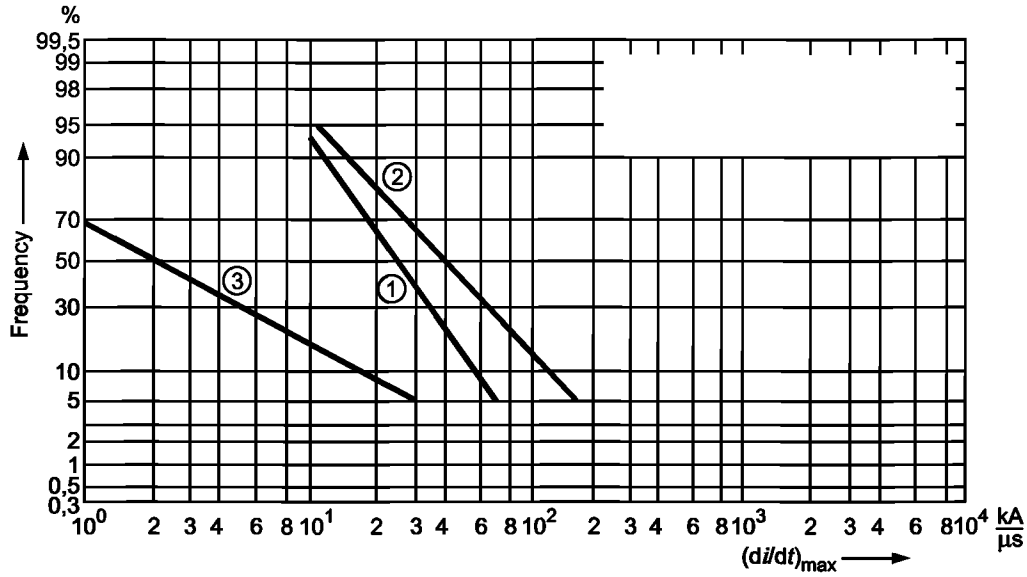
1 Отрицательные первые разряды
2 Отрицательные последующие разряды
3 Положительная молния в землю

Рисунок А.3 — Частотное распределение переходного заряда молнии Q_{trans}



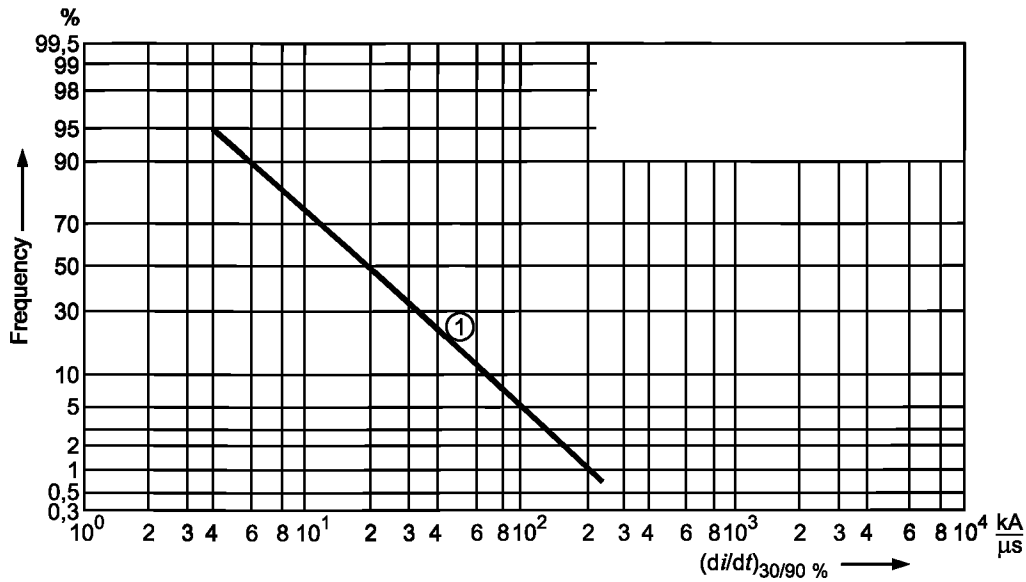
1 Отрицательные первые разряды
2 Отрицательные последующие разряды
3 Положительная молния в землю

Рисунок А.4 — Частотное распределение энергии молнии *W/R*



1 Отрицательные первые разряды
2 Отрицательные последующие разряды
3 Положительная молния в землю

Рисунок А.5 — Частотное распределение максимальной производной переходного тока $(di/dt)_{max}$



1 Отрицательные последующие разряды

Рисунок А.6 — Частотное распределение производной тока $(di/dt)_{30/90\ \%}$ отрицательных вторичных разрядов

А.2 Пример ожидаемого перенапряжения

Для иллюстрации рассмотрим простейшую цепь, приведенную на рис. А.7. Удар молнии, как предполагается, происходит в точке близко к середине воздушной линии длиной 150 м., соединяющей жилой дом с распределительным трансформатором. Принимаем ток с максимальной величиной величина 50 кА, с формой волны 2/50 мкс.

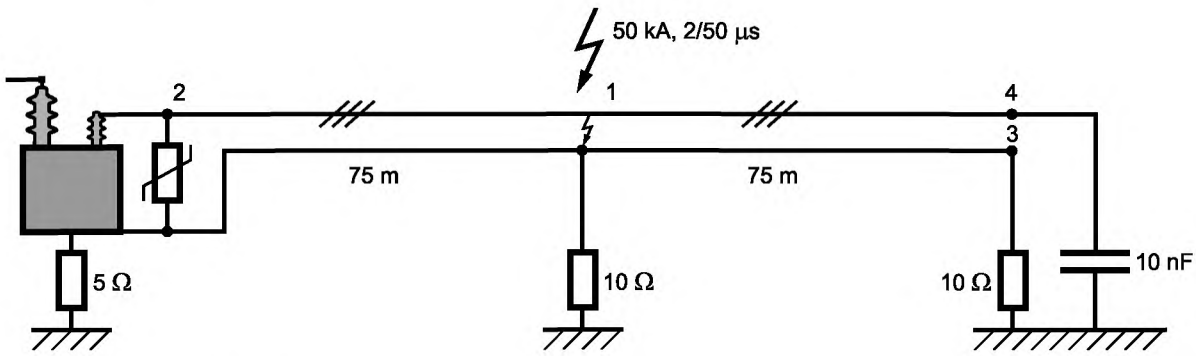


Рисунок А.7 — Упрощенный пример удара молнии в низковольтную воздушную линию

Пробои проводников на землю происходят в точке вблизи точки попадания молнии, предположим, что сопротивление заземления в этой точке составляет 10 Ом. Кроме того принимаем, что распределительный трансформатор защищен импульсными разрядниками и что сопротивление заземления в этой точке — 5 Ом. В установке потребителя сопротивление заземления нейтрали принимается равным 10 Ом. Наконец, в этом примере предполагается, что нет никакого УЗИП и никакой существенной нагрузки у установки потребителя и что уровень изоляция такой, что пробоя не будет. Установка представлена емкостью 10 пФ.

На рис. А.8 и А.9 показаны вычисленные ожидаемые напряжения в четырех узлах схемы, представленной на рис. А.7 для упомянутых выше предположений. На рис.А.8, самое высокое напряжение возникает в точке попадания молнии (узел 1) и самое низкое напряжение в трансформаторе (узел 2), из-за более низкого сопротивления заземления этого узла. На рис.А.9 ожидаемое напряжение рабочего проводника (узел 4), показано, вместе с напряжением в узле 3, также показанного на рис. А.8. Очевидно, что в действительности эти напряжения привели бы к непосредственному пробою.

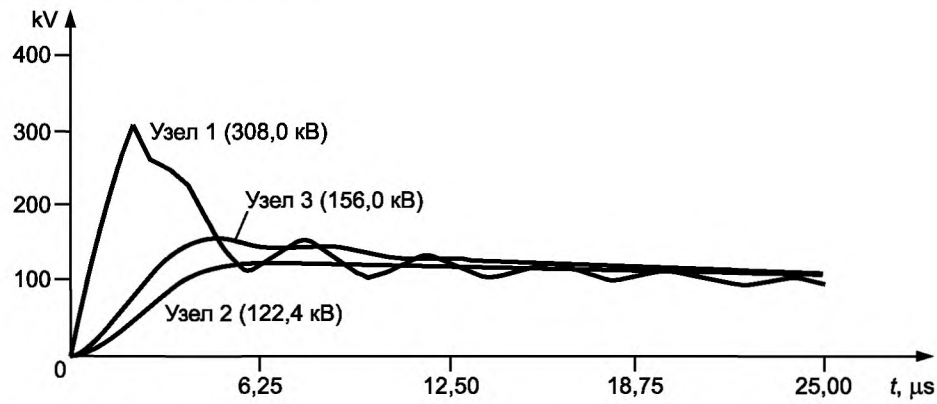


Рисунок А. 8 — Ожидаемые напряжения относительно земли на линии в точке удара (узел 1), на трансформаторе (узел 2) и в нейтральном проводнике в установке потребителя (узел 3)

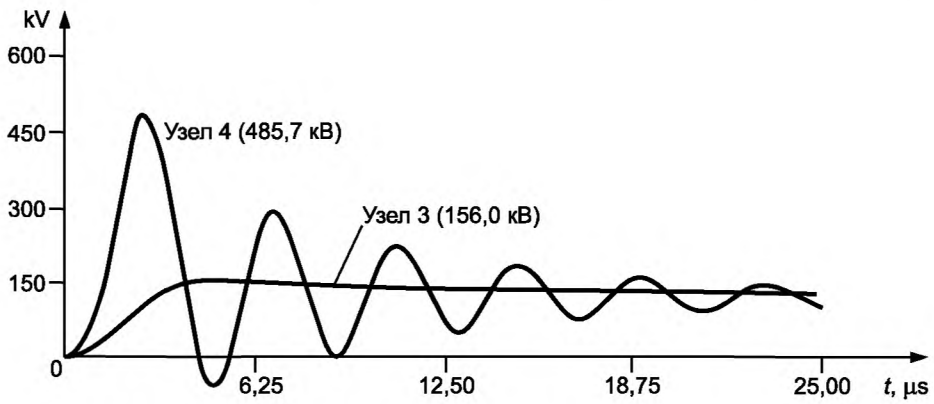


Рисунок А.9 — Ожидаемые напряжения относительно земли в узле 3 и в узле 4

На рис. А.10, показаны вычисленные токи на землю для сценария, приведенного на рис. А. 7. В начальной фазе токи делятся согласно отношению сопротивлений заземления, ток в узле 2 (трансформатор, с сопротивлением заземления 5 Ом) вдвое больше, чем в двух других узлах, где сопротивление заземления принято 10 Ом.

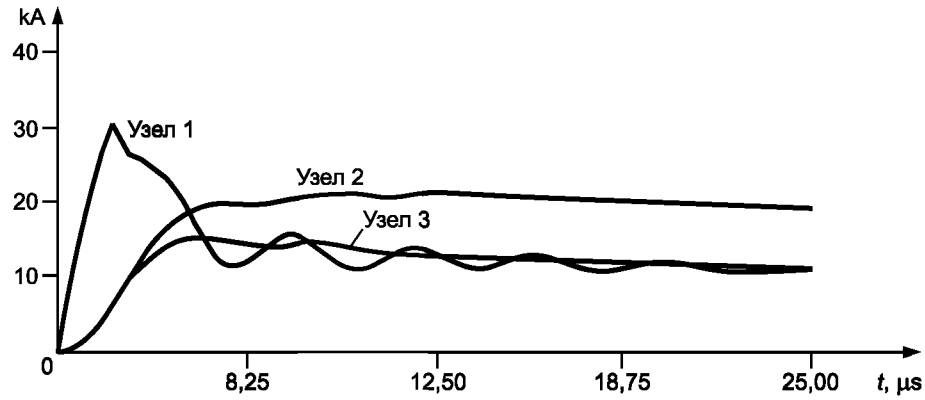


Рисунок А.10 — Ток на землю в точке удара (узел 1), в трансформаторе (узел 2) и в установке потребителя (узел 3)

А.3 Распространение импульсного воздействия в системах СН

Как пример связи и распространения грозовых перенапряжений, в этом пункте приведены результаты измерений выполненные на типовой системе СН (20 кВ) во Франции (где плотность ударов молнии в землю, приблизительно 2 удара на 1 км^2 в год). На рис. А.11 приведена гистограмма пиковых значений записанных в распределительном устройстве трансформатора СН/НН.

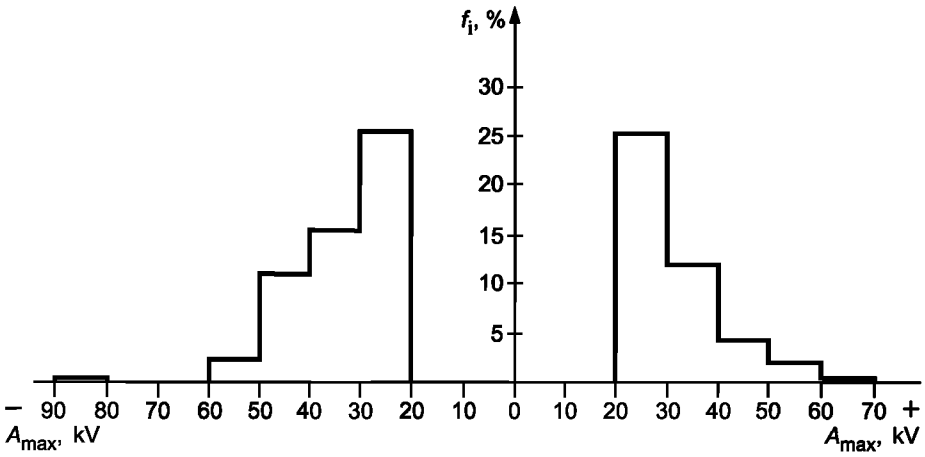


Рисунок А.11 — Распределение величин максимальных перенапряжений, записанных в распределительном устройстве трансформатора СН/НН

Следующие типовые количественные значения были записаны для ударов молнии в системы СН.

a) Большинство перенапряжений в системах СН было сгенерировано индуцированными импульсными перенапряжениями. Прямые удары молнии в провода и в конструкции составляли приблизительно только 3 % от наблюдаемых импульсных перенапряжений.

b) Из 330 импульсных перенапряжений, записанных в течении одного года, только у 10 импульсных перенапряжений величина была выше чем 70 кВ, они могут быть приписаны к прямому удару молнии в провода или конструкции.

c) Типовой трансформатор СН/НН может подвергаться каждый год 75—150 импульсным перенапряжениям, имеющих максимальное значение между 20 кВ и 70 кВ, и 6 импульсных перенапряжений, достигающих максимального значения выше чем 70 кВ.

d) Импульсные разрядники приняли приблизительно 4 % грозовых перенапряжений до 70 кВ, в то время как искровые разрядники приняли только 2 % грозовых перенапряжений 80 кВ.

е) Записанная продолжительность фронта волны кажется независимой от максимального значения импульсного перенапряжения. Среднее значение этой продолжительности — 55 мкс. Вероятность, что продолжительность фронта волны может быть более чем 15 мкс, составляют 90 %.

А.4 Статистическое распределение грозовых перенапряжений в установке СН

Сравнение выполнялось между результатами измерений, согласно моделированию EMTP с использованием статистического метода Монте-Карло. На рис А.12 приведена моделируемая система, которая состоит из распределительного трансформатора 100 кВА, питающего четырехпроводную воздушную линию длиной 1 км, провода расположены на 6 м выше земли и на расстоянии в 0,3 м друг от друга. Линия СН принята длиной 2 км для рассмотрения прямого удара молнии в линию СН с передачей воздействия через трансформатор.

Метод Монте-Карло позволяет проанализировать 1 000 000 ударов молнии, при принятой плотности ударов молнии — 2,2 удара на 1 км^2 в год, на площади 20 х 30 км вокруг линии. Чтобы достигнуть этого результата потребовалось бы 670 лет наблюдений. Величина разрядов была распределена согласно данным CIGRE [1], [2]. Прямые удары в линию не учитывались, но предполагается, что они вызывают перенапряжения выше 20 кВ, верхний предел распределения приведен на рис.А.13.

В части графика, относящегося к более высоким значениям перенапряжений, различия между вычисленными и измеренными значениями могут быть объяснены тем фактом, что в установке СН, пробой может произойти прежде, чем будет достигнут уровень в 10 кВ, что уменьшает снижение в графике, полученном в результате измерений по сравнению с вычисленными данными.

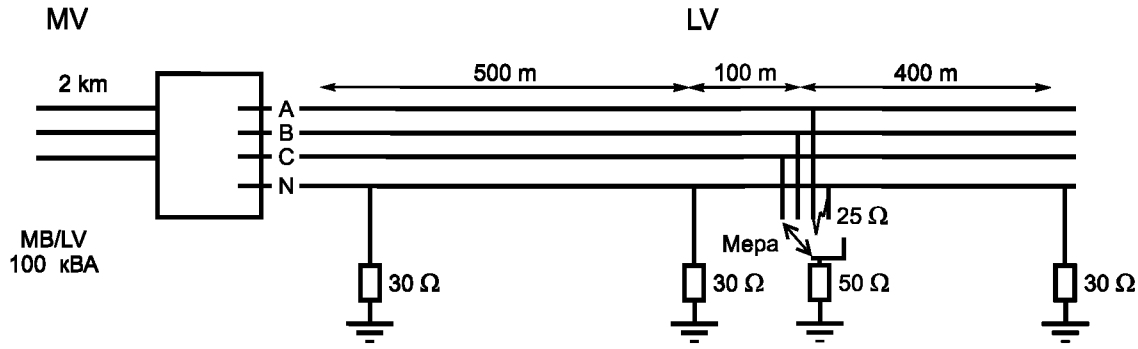


Рисунок А.12 — Схема, используемая для статистического анализа

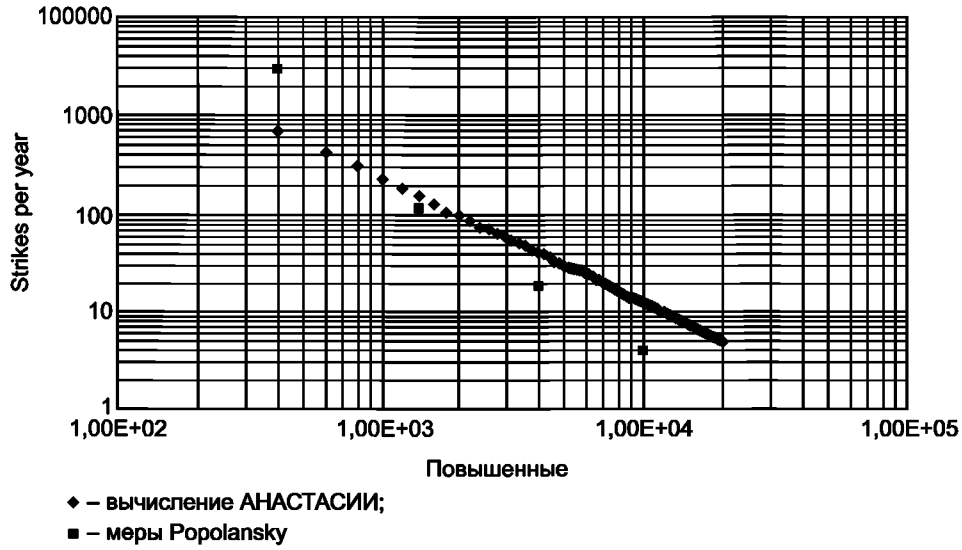


Рисунок А. 13 — Сравнение измеренных и рассчитанных перенапряжений

А.5 Распределение тока молнии среди параллельных установок

Если молния ударяет в здание, которое является одним из нескольких запитанных параллельно от системы НН, ток на землю разделяется и идет по разным путям. Они включают: локальную землю, систему заземления здания, так же как и удаленные заземленные точки через металлические пути, прежде всего через кабель электропитания. Чтобы определить количественно это распределение рассмотрим пример, приве-

денный на рис. А.14 для двух зданий, питающихся от подстанции, когда здание 1 поражается молнией как определено в МЭК 62305-4.

Для здания 1 на рис. А.14, введенный ток i_{imp} стекает с молниеприемника по токоотводу к заземлителю (Р1). В той точке, ток молнии делится на две части, $i_{Earthing}$ текущий в локальную землю, и i_{Mains}, текущий через кабель электропитания к удаленной земле. Эти два тока делятся обратно пропорционально отношению импедансов относительно (Р1). В начальной фазе импульсного тока, текущее разделение определяется отношением индуктивностей, в то время как в конце, где уровень изменения низок, разделение определяется отношением сопротивлений как в (1):

$$i_{Mains}/i_{Earthing} = R_{Mains}/R_{Earthing}, \quad (A.1)$$

Когда несколько зданий подключены параллельно, эффективное сопротивление R_{Mains} уменьшается в соответствии с формулой А.1, поскольку часть тока молнии, текущего в систему НН увеличится, когда большее количество зданий будет соединено параллельно.

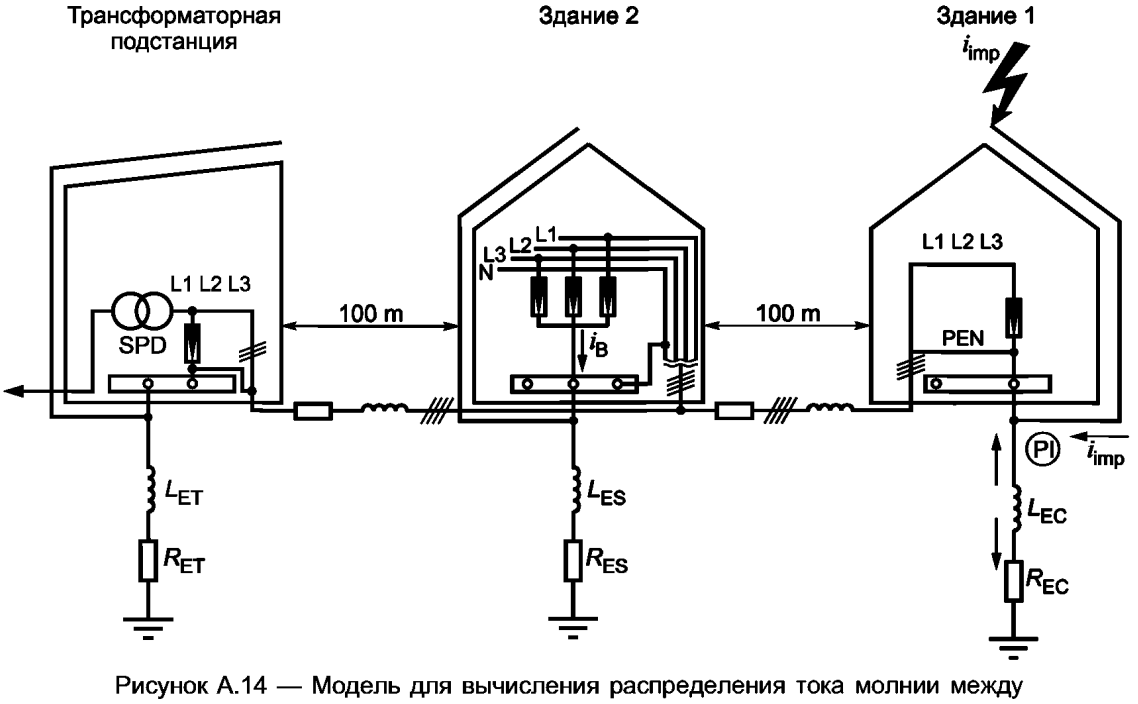


Рисунок А.14 — Модель для вычисления распределения тока молнии между параллельными зданиями (система TN-C)

В точке присоединения здания 2 к кабелю питания (рис. А. 14), ток молнии приходящий со стороны здания 1 и перенесенный кабелем питания стремится к земле и делится на две части, одна к вводу здания 2, другая к трансформаторной подстанции к заземлителю. В трехфазной системе TN-C, кабель включает три фазных и PEN проводник. Часть тока i_{Mains} на вводе здания 2, перенесенном всеми четырьмя проводниками, включая PEN проводник непосредственно подключенный к заземлителю через ГЗШ. В этом случае ток, текущий в PEN проводнике, несколько облегчает работу трех УЗИП, установленных на вводе, за счет переноса одной трети тока на вводе в здание i_B через рабочие проводники.

На рис А.15 приведены формы волны и амплитуды токов для здания 1 и здания 2. Сверху донизу по пути ток молнии i_{imp} (принято максимальное значение тока 100кА) делится на, ток i_{Mains} уходящий по силовому кабелю, ток $i_{Earthing}$ текущий непосредственно на заземлитель здания 1 и полный ток i_B в трех УЗИП здания 2. Необходимо отметить, что в этом примере УЗИП на вводе здания 2 должны допускать максимальный ток больше чем 8 kA, даже для расстояния 100 м между двумя зданиями. Эта ситуация объясняется фактом, что 100 м кабеля добавляют только 0,1 Ом на пути тока i_{Mains}, который течет через два сопротивления заземления, каждые по 10 Ом, здания 2 и трансформаторной подстанции. Результаты моделирования также показывают, что отношение этих двух индуктивностей в начале процесса определяет первоначально больший ток через заземлитель здания 1, но после того, как эффект от влияния индуктивности уменьшается, токи действительно делятся согласно отношению сопротивлений заземления.

Примечание — В вычислениях для примеров на рис. А.14 (и рис. А.16), не учитываются емкости (электропроводки, кабели и оборудование). Если бы эти емкости были учтены, то были бы замечены некоторые отклонения на осциллограммах. Однако, эти отклонения имеют незначительное практическое значение для этого исследования, в котором распределение тока среди различных проводников — главный вопрос.

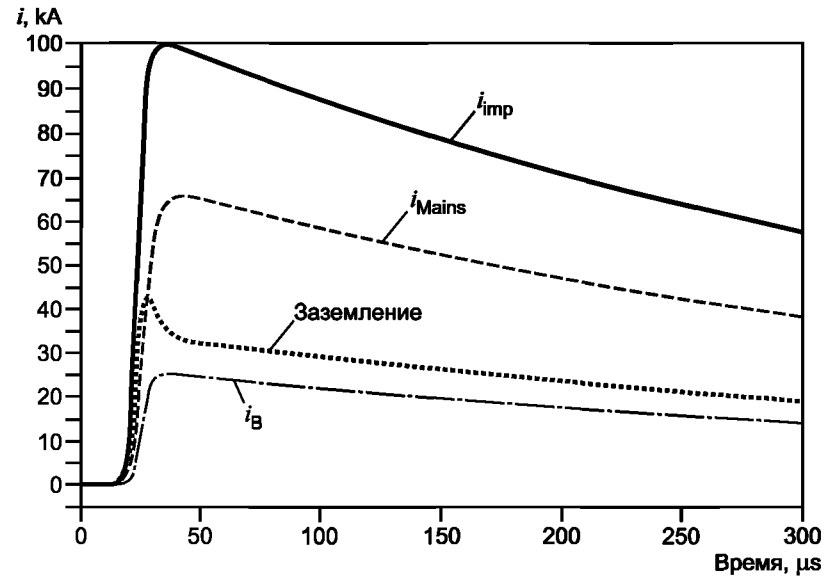


Рисунок А.15 — Распределение тока молнии по направлениям, определенным на рис. А.14

Частичный ток молнии, текущий в каждом заземлителе, приводит к перенапряжениям за счет импедансов, между локальной землей и рабочими проводниками L_1, L_2 и L_3 здания 2. Чтобы проиллюстрировать эту ситуацию, вычисления выполнялись для модели, приведенной на рис. А.14, за исключением того, что никакие УЗИП не были установлены на вводе здания 2, как показано на рис.А.16. Для этой ситуации, как показано на рис. А.17, для обозначенной модели предполагаемое максимальное перенапряжение составляет 200 кВ (U_B на рис А.16) между каждым из проводников линии и PEN проводником. В реальной ситуации это перенапряжение приведет к пробою или вызовет другие повреждения в присоединенном оборудовании. На рисунке А.17 также показаны токи в заземлителях здания 1 и здания 2. Отметьте что после начальной части, где индуктивность имеет определяющее значение, можно ожидать, что ток будет одинаково разделен среди трех заземлителей систем заземления этих двух зданий и трансформаторной подстанции, которые как это было принято, имели одинаковое сопротивление заземления.

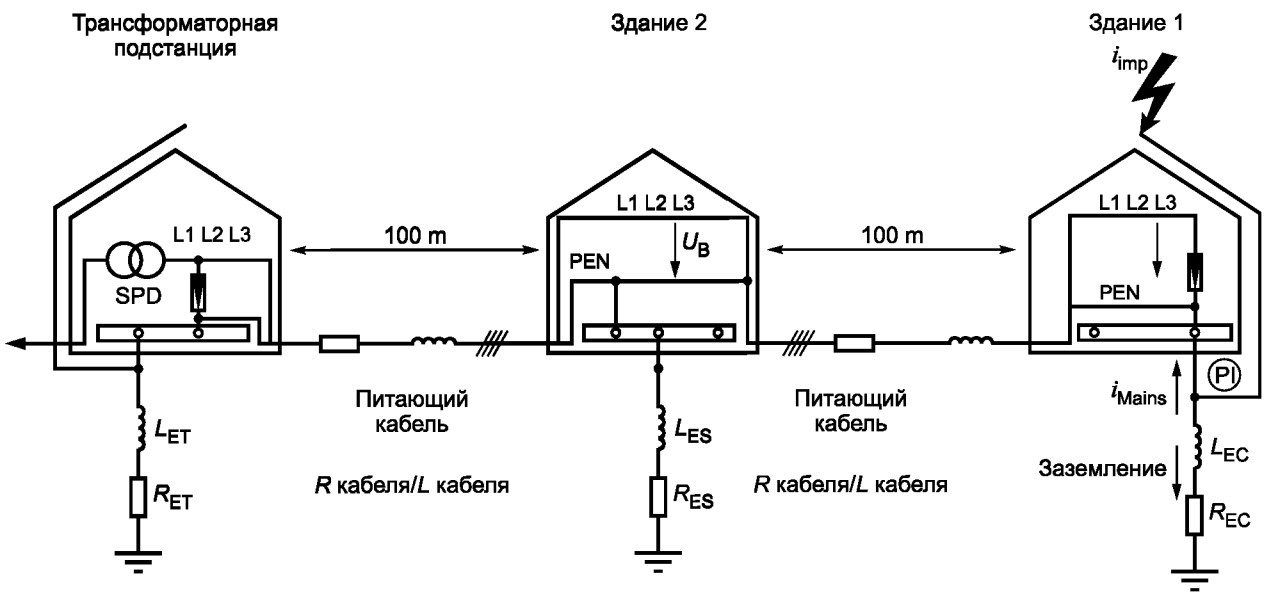


Рисунок А.16 Модель для вычисления распределения тока молнии между зданиями (система TN-C, здание 2 без молниезащиты и УЗИП на вводе)

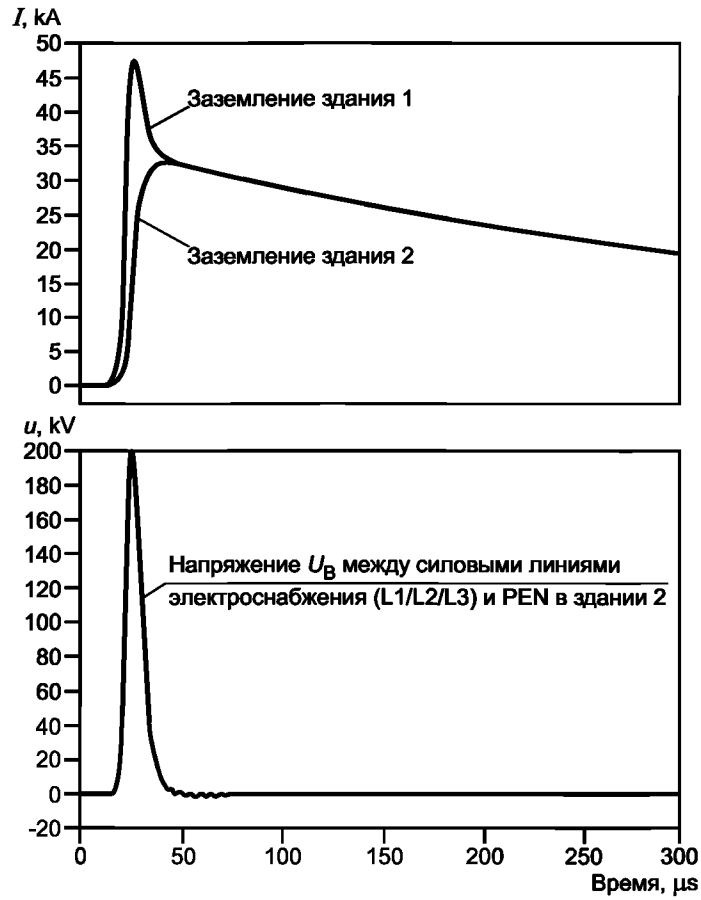


Рисунок А.17 — Ток и напряжение для примера на рис. А.16

Моделирование, указанное выше, проводится с использованием известной программы PSPICE, в то время как моделирование Mansoor проводилось по не менее известной программе EMTP.

Как общее заключение можно сказать, что чем выше плотность застройки в данной зоне, тем большая часть тока молнии течет к заземлителю через питающий кабель НН поражаемого здания. Это заключение распространяется как на поражаемое здание, так и на смежные здания.

Приложение В
(справочное)

Коммутационные перенапряжения

Грозовые перенапряжения, описанные в разделе 5 и приложении А, главным образом основаны на теоретических вычислениях и понятии ожидаемое перенапряжение (без мер по ограничению напряжения). Напротив, для коммутационных перенапряжений, в литературных источниках отсутствуют данные о теоретических исследованиях в различных существующих низковольтных системах, поскольку они трудновыполнимы. Вместо этого данные были получены на основании записей переходных процессов в существующих системах, от подготовленных натурных испытаний или на основании упрощенных лабораторных экспериментов.

Общие соображения о возникновении коммутационных перенапряжений были представлены в разделе 6. В этом приложении детализированны механизмы, приводящие к коммутационным перенапряжениям, полученные в результате измерений (контроля) коммутационных перенапряжений в реальных системах электроснабжения переменного тока, специальных измерениях, проводимых для конкретных зданий или несколько упрощенных лабораторных экспериментов:

a) в разделе В.1 описан механизм, при котором коммутационные перенапряжения могут быть усилены за счет переходного резонанса в отдельных цепях;

b) в разделе В.2 представлен краткий обзор коммутационного перенапряжения специального типа, связанного с включением или отключением конденсаторных батарей;

c) в разделе В.3 описывается механизм, возникновения существенных перенапряжений при срабатывании предохранителей;

d) в разделе В.4 представлен краткий обзор мониторинга последствий переходных процессов;

e) раздел В.5 дает некоторую возможность оценить процессы распространения коммутационных перенапряжений, полученных для стандартных форм импульсных воздействий на модель установки или на реальное здание. (Эти результаты также полезны для рассмотрения распространения грозовых перенапряжений со стороны ввода питания);

f) в разделе В.6 приведены некоторые примеры коммутационных перенапряжений, наблюдаемых в лабораторных экспериментах, включая операции отключения цепей;

g) в разделе В.7 приведены некоторые примеры коммутационных перенапряжений, наблюдаемых в лабораторных экспериментах, включая сгорание предохранителя.

В.1 Переходный резонанс

Частота колебаний во время коммутационных операций определяется характеристиками системы, при этом иногда могут происходить резонансные явления. В таких случаях, могут инициироваться очень высокие перенапряжения. Вероятность резонанса с гармониками на частоте системы питания обычно низка. Состояние переходного резонанса может также произойти, если характерная частота коммутируемой части системы близка к одной или более резонансным частотам остальной части системы. Чтобы иллюстрировать это явление, рассмотрим пример, показанный на рисунке В.1. Резонансные частоты двух замкнутых контуров цепи близки. Кроме того, импеданс первого, управляющего контура низок по сравнению со вторым замкнутым контуром. Для высоких частот в зависимости от частоты системных потерь нужно рассмотреть порядок получения реалистических результатов. Сопротивления, показанные на рисунке, как предполагается, репрезентативны для резонансных частот рассматриваемых цепей.

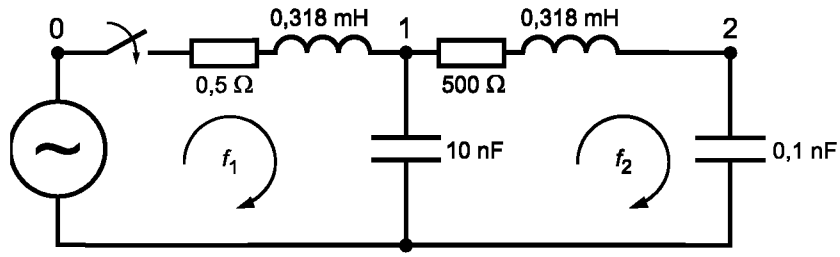


Рисунок В.1 — Пример, иллюстрирующий переходный процесс, вызванный коммутацией

Расчетные напряжения в узлах схемы приведены на рисунке В.2. Частота колебаний очень высока по сравнению с частотой напряжения питания, и это напряжение (узел 1) фактически постоянно в рассматриваемом временном интервале. Часть a) рисунка В.2 показывает, что имеет место типичная модуляция. Частота модуляции в основном определяется различием между частотой двух замкнутых контуров цепи. Детали переходных процессов отмечаются в части b) рисунка.

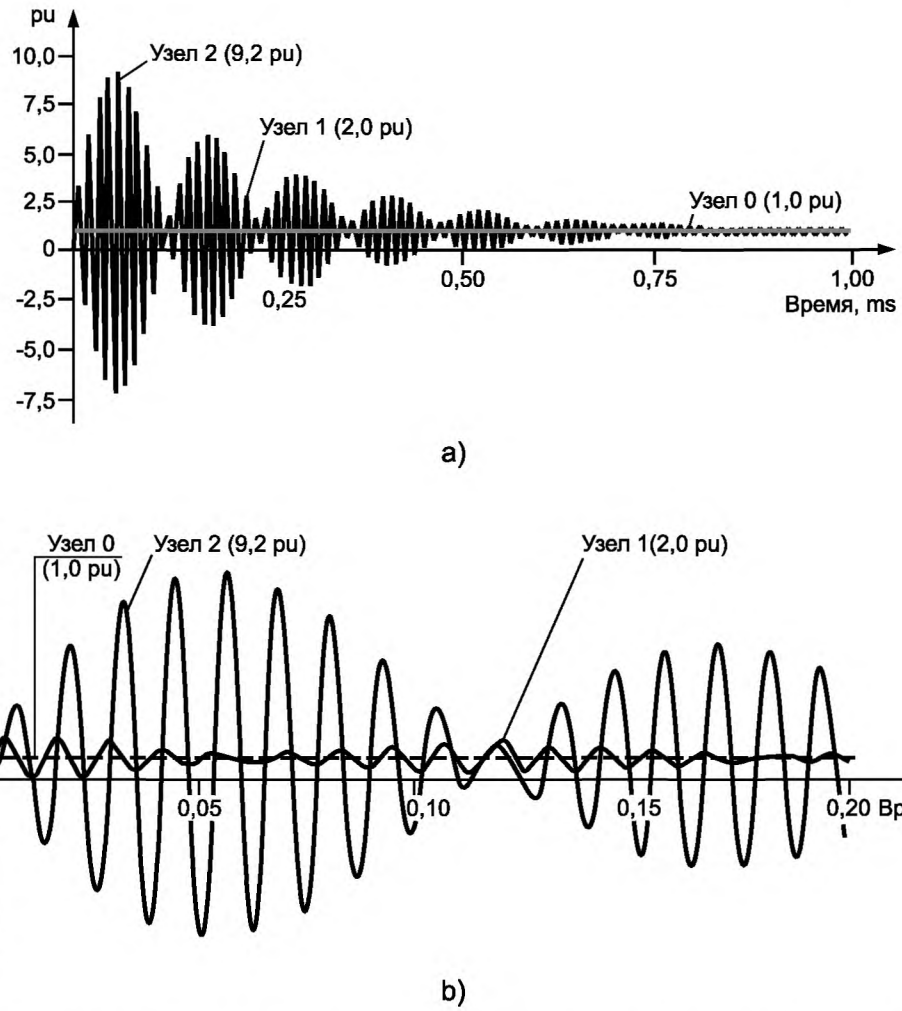


Рисунок В.2 — Расчетные перенапряжения в узлах цепи, изображенной на рис. В.1

Вероятность возникновения таких перенапряжений в низковольтной системе низка, но явление должно быть отмечено. Кроме того перенапряжения могут произойти на частоте более высоких гармоник (3-ей, 5-ой, 7-ой, и т.д.) характерных частот различных частей системы.

В.2 Перенапряжения при коммутации конденсаторов

В.2.1 Косинусные конденсаторы

Перенапряжения при коммутации конденсаторов, — это важный тип коммутационного перенапряжения для некоторых установок, там где в оборудовании или у конечного потребителя конденсаторные батареи применяют в целях поддержания косинуса фи или для управления напряжением. Эти батареи включаются или в фиксированное время суток, согласно прогнозируемому графику нагрузки, или автоматически, согласно потребности определенной системы управления.

Недавние натурные наблюдения за переходными процессами коммутации конденсаторов показали, что частоты имеют низкие значения, порядка нескольких сотен герц (IEEE 1036). Кроме того, исходный импеданс коммутируемого конденсатора, как источника импульсных перенапряжений, в значительной степени зависит от количества коммутируемой реактивной мощности по отношению к реактивной мощности основной системы.

Рисунок В.3 показывает пример перенапряжения, записанного на шинах системы электроснабжения во время подачи питания на конденсатор. Обычно, этот тип перенапряжения, с уровнями в диапазоне 1,2—1,7 от номинального не вызывают беспокойства при применении оборудования, потому что максимальные величины ниже уровня при котором начинают работать устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП). Из-за относительно низкой частоты эти перенапряжения проходят через распределительный трансформатор и появляются в системах СН. Там, УЗИП с относительно низкими ограничивающими напряжениями могут сработать в попытке отработать импульсное перенапряжение с высокой амплитудой при коммутации конденсатора, и подвергаются опасности, если исходный импеданс низок.

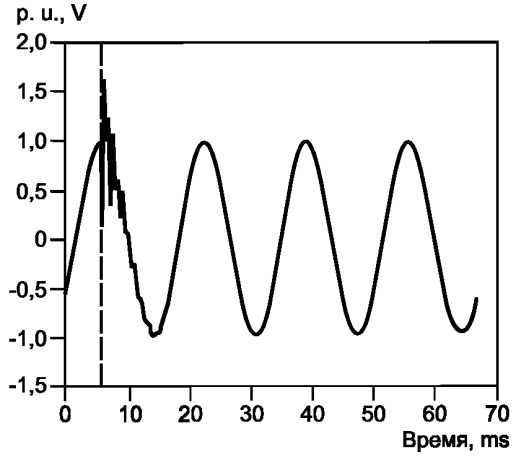


Рисунок В.3 — Типовое перенапряжение, возникающее при подключении конденсаторной батареи

Низкая частота (относительно кольцевой волны 100 кГц или комбинированной волны) импульсного перенапряжения при коммутации конденсатора может внести высокую энергию в УЗИП из-за его большой продолжительности и низкой частоты. Низкая частота приводит к слабому затуханию, так как влияния индуктивности, которые являются очень существенными при рассмотрении распространения микросекундных импульсных воздействий, являются обычно намного менее существенными при рассмотрении импульсного перенапряжения при коммутации конденсатора. Например, в низковольтной установке, на УЗИП, установленный в конце ответвленной цепи, фактически будет воздействовать то же самое возмущение, что и на разрядник на вводе. В зависимости от относительных ограничивающих напряжений двух УЗИП, координация между этими двумя устройствами может быть или не быть достигнута.

В.2.2 Амплитуда напряжения

Явление резонанса было обсуждено в разделе В.1 для примера с высокой частотой и низким значением емкости (микрофарады). Резонанс может также произойти при низкой частоте и больших емкостях (миллифарады), подключенных к промышленной установке. Рисунок В.4а показывает пример цепи, где такое явление может произойти, рисунок В.4b показывает, как относительное напряжение 1,88 инициированное в результате

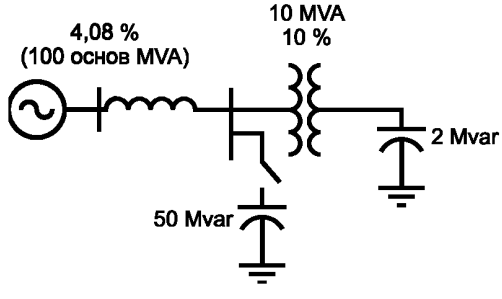


Рисунок В.4а — Условие увеличения

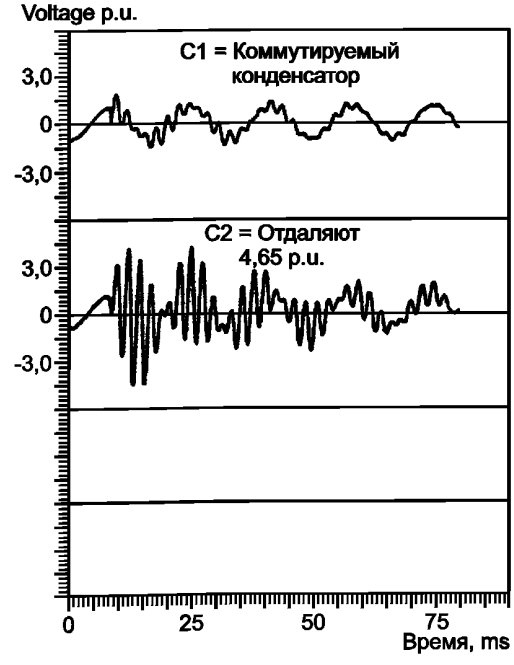


Рисунок В.4b — Эффект увеличения

Рисунок В.4 — Увеличение перенапряжения при коммутации удаленной конденсаторной батареи

переходного процесса вызывает относительное перенапряжение 4,65 во втором (удаленном) помещении. Это перенапряжение воздействует на нагрузки соединенные параллельно.

Возможность возникновения импульсных перенапряжений при коммутации конденсатора следует рассмотреть, когда УЗИП установлен около крупных коммутируемых конденсаторных батарей. Однако существует неоднозначность в определении, что такое близко и что такое крупный. На этом этапе исследований, кажется, что широкие обобщения опасны, и явление лучше всего рассматривать для конкретных случаев, в зависимости от конкретных условий. Когда нет никакого коммутационного увеличения напряжения, при выборе УЗИП не требуется специального рассмотрения, кроме ограничения по напряжению, что демонстрирует незначительность данной проблемы в этом случае.

С другой стороны, хотя случаи увеличения напряжения довольно редки, возникает необходимость использовать дополнительные компенсирующие мероприятия (расстраивание, ступенчатое переключение, вставка сопротивления, и т.д.) для их снижения, потому что у поглощающих энергию УЗИП нет возможности отработать такой энергетический уровень.

В.3 Коммутационные перенапряжения, вызванные срабатыванием предохранителя

Предохранители широко используются в системах электроснабжения и в электрических установках для защиты от сверхтока и для отключения коротких замыканий. Если предохранитель отключает короткое замыкание в системе электроснабжения, то он генерирует противонапряжение со значением выше мгновенного линейного напряжения.

Это перенапряжение также передается через шины к другому оборудованию, питающемуся от той же самой системы электроснабжения. Для предохранителей, которые работают быстрее, чем защитная коммутационная аппаратура и таким образом создают более высокие перенапряжения на рисунке В.5 показаны общие условия, которые объясняются следующим образом.

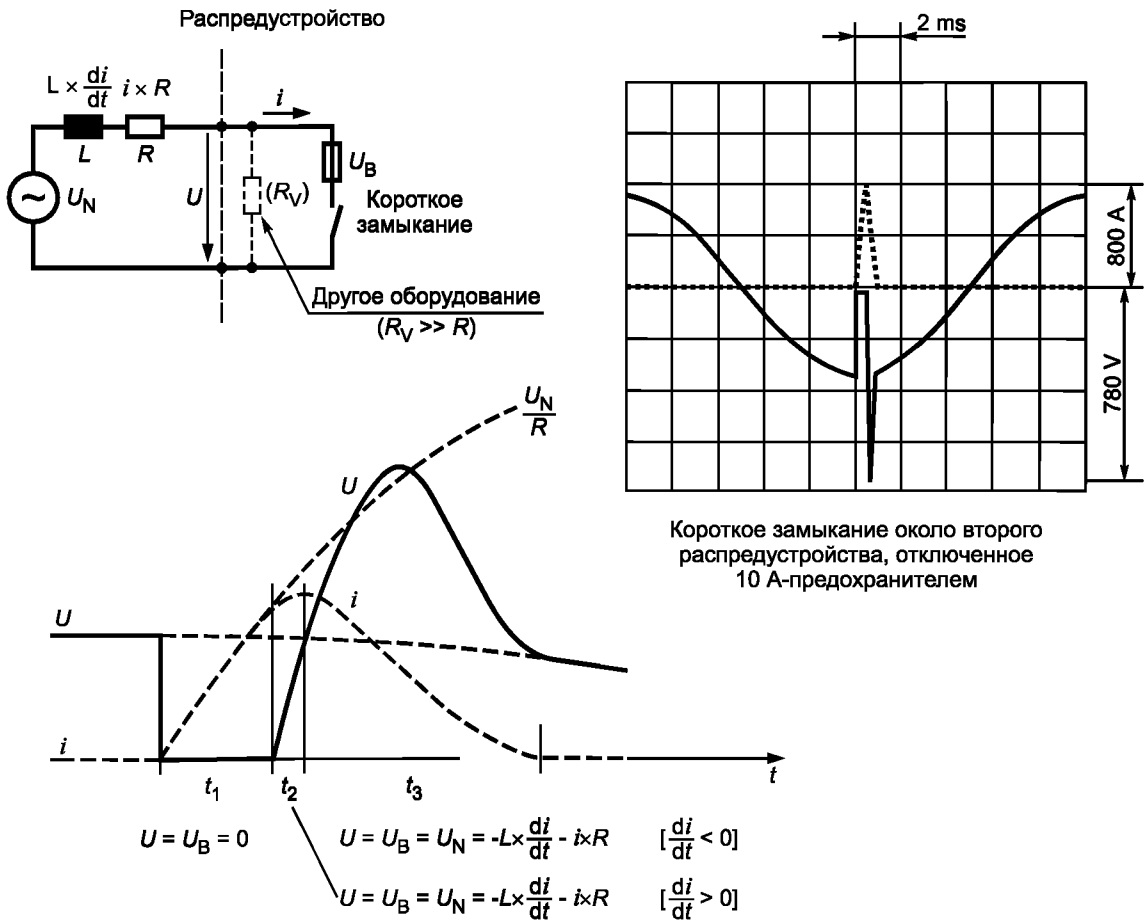


Рисунок В.5 — Перенапряжение, сгенерированное отключением короткого замыкания

В момент времени t_1, происходит короткое замыкание и напряжение U_B на предохранителе возрастает от нуля до значения в точке плавления вставки — время t_2 с образованием электрической дуги. Когда напряжение дуги U_B достигает уровня линейного напряжения, за вычетом падения напряжения на индуктивности и сопротивлении, ток короткого замыкания I достигает максимального значения. В период времени до t_3, когда ток дуги обнуляется, напряжение на дуге растет быстро и до высоких значений. На выделяемую энергию другие системные нагрузки имеют незначительное воздействие, потому что его внутреннее сопротивление R_V является большим по сравнению с внутренним сопротивлением R системы.

В.4 Мониторинг коммутационных перенапряжений

Перенапряжения, записанные при крупномасштабных натурных измерениях, редко коррелируются с возмущениями в системе электроснабжения, коммутационными перенапряжениями или ударами молнии. Поэтому, эти измерения относятся только к совместному воздействию всех явлений, а не только к коммутационным перенапряжениям, хотя в некоторых измерениях, фиксируются отсутствие действия молнии во время записи. Измерения были также проведены в реальных системах, во время специально подготовленных измерений при коммутациях, но эти результаты ограничиваются определенными условиями проведения испытаний. Теперь появляются интересные разработки в технологии обнаружения месторасположения попадания молнии, проводимые при поддержке страховых компаний, с целью согласования требований к ущербу при ударе молнии с фактическим возникновением ударов молнии в данной области. Такой контакт в области определения событий молнии мог бы, в конечном счете, позволить разделять связанные с молнией импульсные перенапряжения от коммутационных импульсных перенапряжений среди результатов контрольных замеров перенапряжения.

С другой стороны, все перенапряжения в реальных системах ограничиваются изоляцией, уровнем защищенности системы и присоединенного оборудования. Кроме того, УЗИП, которые устанавливаются в системе (и также встроенные УЗИП, в присоединенном оборудовании нагрузки), ограничивают измеренные напряжения. Это существенное изменение в системах электроснабжения, появившееся в начале восьмидесятых годов и теперь хорошо рассмотренное, должно быть принято во внимание, при рассмотрении числовых значений приведенных в новых обзорах. Для будущих обзоров исследований было бы хорошо рассмотреть вопросы определения токов, импульсные воздействия которых оказывают влияние на выбираемое УЗИП, с целью оптимизации места его установки, вместо того чтобы контролировать его влияние на соседние УЗИП.

Мониторинг переходных перенапряжений был сделан многими исследователями с 1960-ых. Для оценки коммутационных перенапряжений в низковольтных установках требуется длительное время измерений и их статистическая оценка. Эти измерения до середины восьмидесятых выполнялись с помощью осциллографов и системных камер, теперь они выполняются при помощи автоматических систем записи основанных на цифровых осциллографах хранения или на полностью цифровых системах сбора данных.

Результаты зависят от максимальной измеряемой амплитуды и пропускной способности (соответствующих максимальному измеряемому уровню) измеряющей системы. При измерениях использовалась система с довольно большой пропускной способностью (20 МГц), но измеряемый максимум амплитуды составлял только 3 кВ. Пропускная способность составляла только 5 МГц, но могли быть измерены амплитуды до 5 кВ, и импульсные перенапряжения с большими амплитудами могли быть записаны. Сегодня используются системы и с более высокой пропускной способностью (50 МГц) и с максимальной измеряемой амплитудой (> 6 кВ). Кроме того, на результаты значительно влияет расположение системы измерения, вид установки, полное время измерения и еще много параметров.

Измерения проводились в различных системах (TT или TN), поэтому результаты, о которых сообщают, в одном случае относятся к измерениям между линией и локальной землей и в другом случае измерениям между линией и нейтральным проводником.

В Германии было исследовано много промышленных объектов, прежде всего в, но время проведения измерений для каждого объекта было довольно коротко. В установках объектов торговли, были записаны подобные амплитуды. Однако, так как полное время измерения 1202 часов и число событий 3401 было сравнительно низко, вероятность возникновения коммутационных импульсных перенапряжений оказалась значительно ниже. Рисунок 22 показывает частоту возникновения по сравнению с пиковым уровнем для разнообразных объектов, приведенных в рассматриваемом документе.

В Германии контролировались также домашние хозяйства, офисы и лаборатории в. На рис.В.6 показан график результатов этих двух исследований.

Позже были добавлены промышленные объекты. Дополнительные измерения выполнялись в период больше трех месяцев для каждого объекта. В таблице В.1 приведена сводка этих измерений, которые хорошо соответствуют предыдущим данным, особенно если принимаются во внимание более ранние данные для различных объектов и ограничения по амплитудному диапазону измерения.

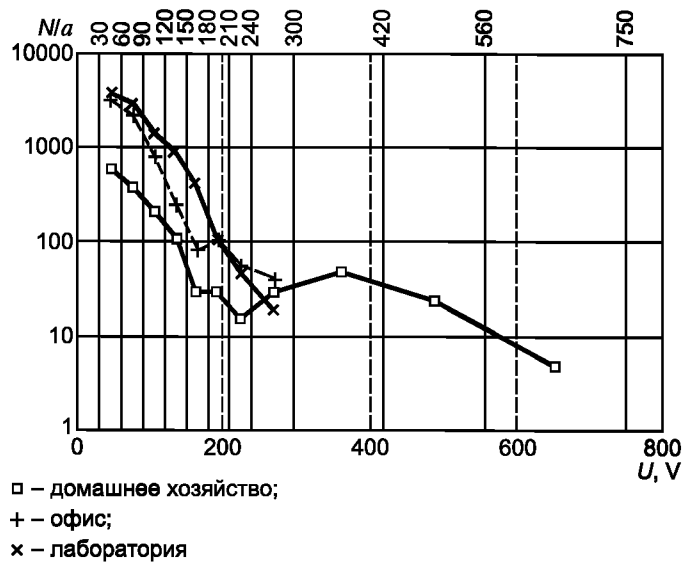


Рисунок В.6 — Пример коммутационных перенапряжений в трех типах установок

Таблица В.1 — Минимальные, максимальные и средние значения амплитуды и производной для коммутационных импульсных перенапряжений для различных объектов

	Домашнее хозяйство	Офис	Лаборатория	Промышленный
Минимальная амплитуда, В	35	35	35	50
Максимальная амплитуда, В	644	294	257	4916
Средняя амплитуда, В	97	80	86	280
Минимальный уровень производной, В/мкс	4	1	2	270
Максимальный уровень производной, В/мкс	1 690	1 190	1 385	10 766
Средний уровень производной, В/мкс	255	253	216	600

В промышленных установках оборудование может быть расположено на весьма незначительных расстояниях от распределительного трансформатора и распредустройства. При этих условиях были записаны коммутационные импульсные перенапряжения с амплитудой порядка 5 кВ. Можно отметить, что по оценке абсолютной вероятности возникновения коммутационных импульсных перенапряжений (***N/a*** = событий ежегодно), приведенной на рисунке В.7 для трехфазных систем электроснабжения, существует обратная зависимость согласно закона регулярного распределения, от специально вызывных коммутационных перенапряжений с амплитудой порядка 5 кВ.

Последние могли быть выделены при отключении одного распределительного трансформатора на выходные дни. Очевидно, что такие специальные ситуации также требуют специальных защитных мер.

В проведенных исследованиях в большей степени акцент был сделан на падениях и прерываниях напряжения, чем на импульсных перенапряжениях, этот обзор является попыткой охарактеризовать качество питания в низковольтных системах потребителей в Северной Америке. Результаты для записанных переходных процессов приведены в таблице В.2. Существенное открытие, сделанное в этом обзоре, касается относительно редкого возникновения высокоамплитудных переходных процессов, который предлагается считать результатом быстрого увеличения применения УЗИП в низковольтных системах потребителей.

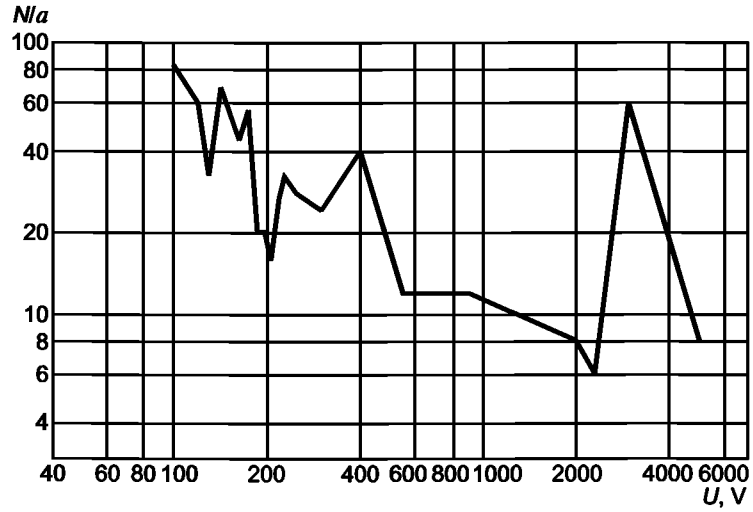


Рисунок В.7 — Коммутационные импульсные перенапряжения на промышленном предприятии, измеренные вблизи распредустройства

Таблица В.2 — Распределение зарегистрированных переходных процессов

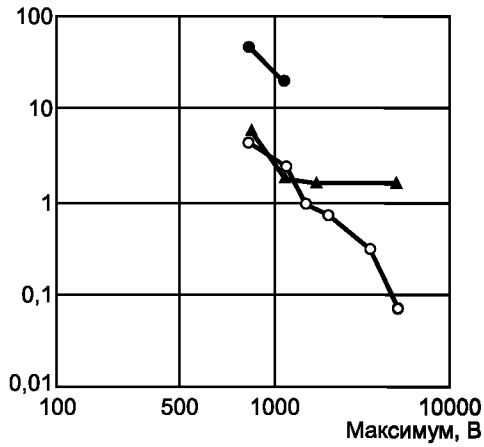
>1000	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
901—1000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
801—900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701—800	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
601—700	1	2	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
501—600	0	0	1	3	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
451—500	0	1	2	4	0	0	1	1	0	1	1	0	0	4	1	0
401—450	1	2	4	12	0	1	3	1	1	1	10	0	1	16	0	0
351—400	0	6	10	14	3	2	2	2	1	5	10	7	2	11	1	2
301—350	1	10	15	15	4	3	6	3	25	21	23	9	9	19	8	1
251—300	3	5	14	20	6	15	39	6	58	67	79	23	15	31	8	8
200—250	5	25	60	23	13	130	473	78	116	158	210	86	15	58	20	9
150—200	19	89	187	728	687	976	1702	1975	749	832	887	513	214	197	99	36
100—150	140	503	1350	3875	2488	11108	7035	3816	3352	12193	4162	2536	811	393	357	234
	<1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—10	10—20	20—30	30—50	50—100	100—150	150—200	200—250	250—300	300—400	400—500

Примечание — Сто тридцать точек контролировались, что составило 1 200 месяцев контроля. Половина измерителей были на месте в течение целого года, и половина были на месте в течение шести месяцев.

Измерения были сделаны для однофазных или многофазных систем, между линией и нейтралью, с целью оценки напряжения применялись электронные компоненты, присоединенные между линией и нейтралью. Напротив, некоторые из измерений были сделаны между линией и локальной землей, в целях оценки напряжения, приложенного к изоляции оборудования.

Измерения в Германии проведены один для общего применения и один для опасных помещений. Цель состояла в том, чтобы контролировать максимальные перенапряжения, приложенные к изоляции низковольтного оборудования.

В первом случае исследования в течение двухлетнего периода проводились в 40 точках, включая торговые и производственные помещения, а так же офисные здания и жилые здания. Рисунок В.8 показывает частоту возникновения событий в год. Исходные данные не предоставляет информацию о пробоях, кроме тех, чья продолжительность составила, по крайней мере, 1 мс, и которые должны были быть зарегистрированы. Поскольку основная цель была оценить напряжение на изоляции, регистрация пробоев была менее важна, чем регистрация пиковых значений.



● – химический завод;
▲ – жилая зона;
○ – обощеннный результат

Примечание. Переходные процессы напряжением ниже 1 000 В не считаются угрозой для изоляции оборудования.

Рисунок В.8 — Частота появления на выбранных объектах и обобщенные результаты

Во втором случае исследования перенапряжения были проведены в 25 помещениях, где могли бы ожидаться частые и существенные перенапряжения. Были выбраны помещения с напряжением питания 400 В и измерения были сделаны между линией и защитной землей. Согласно отчету этого исследования все УЗИП, которые были обнаружены в точках измерения, были отключены. Однако трудно гарантировать, что все УЗИП были разъединены, учитывая широко распространенную практику применения встроенных УЗИП в современном оборудовании.

Большинство записанных перенапряжений были в диапазоне от 500 до 1 000 В, но для оценки были рассмотрены только те, что были выше 1 000 В. Ожидания того, что частые и существенные перенапряжения были бы найдены в опасных помещениях не были проверены. В некоторых помещениях, не были превышены даже пороги в 500 В.

В таблице В.3 приведена сводка результатов. Для большинства зафиксированных переходных процессов перенапряжения были намного ниже, чем ожидалось, что связано с быстрым увеличением незафиксированных УЗИП. Для тех низковольтных систем, где отсутствует защита, больших рисков можно избежать, если использовать оборудование с высоким классом защищенности или применяя соответствующий УЗИП.

Таблица В.3 — Измерительные точки и результаты долгосрочного измерения (вторая часть)

Измерительные точки	Тип установки	Тип сети	Результаты измерений					
			0,5 кВ	1 кВ	1,5 кВ	2 кВ	4 кВ	6 кВ
Муниципальный зал	Коммунальная	Воздушная линия	X					
Автомобильная отрасль	Индустриальная	Кабель						
Производство № 2	Индустриальная	Воздушная линия						
Производство УЗИП	Индустриальная	Кабель	X					
Открытая горная выработка	Индустриальная	Кабель						
Химическая фабрика № 1	Индустриальная	Кабель	X	X	X			
Химическая фабрика № 2	Индустриальная	Кабель						

Окончание таблицы В.3

Измерительные точки	Тип установки	Тип сети	Результаты измерений					
			0,5 кВ	1 кВ	1,5 кВ	2 кВ	4 кВ	6 кВ
Текстильная фабрика	Индустриальная	Кабель	X					
Высотное здание	Индустриальная	Кабель	X					
Фабрика древесно-стружечной плиты	Индустриальная	Кабель	X					
Производство № 1	Индустриальная	Кабель	X					
Университетская лаборатория	Образование	Кабель	X					
Покрасочная фабрика	Индустриальная	Кабель	X					
Фабрика	Индустриальная	Кабель	X					
Фабрика коммутационной аппаратуры	Индустриальная	Кабель	X					
Телевизионный передатчик	Разное	Кабель	X					
Телекоммуникационная станция	Разное	Кабель	X					
Главный ввод № 1	Вводное устройство	Воздушная линия + кабель	X					
Главный ввод № 2	Вводное устройство	Воздушная линия	X					
Жилое здание	Коммунальная	Кабель	X	X	X	X		X
Окружной офис	Офис	Воздушная линия						
Станция башни	Вводное устройство	Воздушная линия	X					
Ферма	Разное	Воздушная линия	X					
Радио-передатчик № 1	Разное	Воздушная линия	X					
Радио-передатчик № 2	Разное	Воздушная линия	X					

В.5 Распространение коммутационных перенапряжений

Рассматривается возможное затухание или увеличение коммутационных перенапряжений в пределах низковольтных установок. Эти явления следует рассмотреть с учетом формы коммутационных перенапряжений для типовой конфигурация низковольтной установки. Возможны явления волновой передачи и/или затухание за счет потерь при передаче и ветвления цепей. Первое явление имеет значение только, если время перемещения волны по линии составляет не менее одной трети от времени коммутационного перенапряжения. Это означает, что для стандартного импульса с передним фронтом 1,2 мкс длина линии должна быть порядка 70 м с учетом явлений волновой передачи.

Можно было бы ожидать, что линии такой длины могли показать затухание, вызванное диэлектрическими потерями или поверхностными эффектами. Однако измерения показали, что даже для линий длиной 75 м, для стандартного импульса 1,2/50 мкс, затухание за счет потерь несущественно с точки зрения максимальной амплитуды коммутационных перенапряжений.

Поскольку совместное воздействие отражений, затухания и ветвления довольно сложно, измерения распространения импульсного перенапряжения выполнялись в установке, включающей 10 ответвленных цепей различной длины и импеданса, получающей питание от основного распредустройства и нескольких вторичных распредустройств (щитков). Все измерения были сделаны между одной фазой и землей, при подключении к генератору с внутренним импедансом 25 Ом. Максимальная длина линии, выбранная для модели, была такой, что отражения могли бы происходить даже для стандартного импульса. В подобном эксперименте, выполненном в новом здании, прежде, чем оно было сдано в эксплуатацию, измерения по распространению проводились с инжекцией импульса комбинированной волны также как и для кольцевой волн 100 кГц. Для комбинированной волны (источник с импедансом 2 Ом), результаты подробно рассмотрены выше. Для кольцевой волны существенные отражательные эффекты наблюдались на открытых концах более длинных ответвленных цепей (от 40 до 70 м).

С другой стороны, более крутые перенапряжения, такие как в быстрых переходных процессах серия (EFT) МЭК 61000-4-4 значительно ослабляются на длине линии в несколько метров. Включение и отключения контак-

тора, который является источником этих быстрых переходных процессов, больше проблема ЭМС, чем забота о борьбе с перенапряжениями. Кроме того, эффекты от наложения этих быстрых переходных процессов обычно не уменьшаются стандартным УЗИП, предназначенным только для уменьшения амплитуды напряжения.

В.6 Примеры при срабатывании автоматического выключателя

В.6.1 Автоматический выключатель и операции коммутации в установке потребителя

Во время выключения оборудования у коммутационного перенапряжения на стороне нагрузки более высокая амплитуда и энергетическая способность, чем та, что появляется на стороне линии. Однако это, главным образом, проблема касается проектирования определенного коммутируемого оборудования. Если другое оборудование будет соединено параллельно, то оно также будет подвержено воздействию. Перенапряжение на стороне установки имеет большее значение для всей системы и для оборудования, соединенного с ней. Перенапряжение при включении будет выше, если подключается оборудование с высоким током нагрузки.

Обычно более высокие амплитуды генерируются при отключении оборудования. Амплитуды 1,9 кВ наблюдались в подготовленных измерениях, с уровнями производной до 5 кВ/мкс. Отключение контакторов может вызвать перенапряжения с амплитудами до 600 В. Уровень повышения будет в пределах 50 В/мкс. Выключение контакторов может вызвать намного более высокие импульсные перенапряжения на стороне нагрузки. Наблюдались амплитудные значения до 2,3 кВ. Испытания для контактора в режиме включения, могут фактически включить и пакетные испытания на отключение, когда и возникают быстрые переходным процессы.

Коммутация миниатюрных выключателей с номинальными токами в несколько ампер не вызывает проблем, связанных с коммутационными перенапряжениями. Даже отключение коротких замыканий вызывает незначительные перенапряжения на стороне установки. Как правило, амплитуды перенапряжений на стороне установки оказываются ниже 500 В. Пример результатов испытаний для различных номиналов типовых миниатюрных выключателей приведены в таблице В.4.

Таблица В.4 — Значения амплитуды и производной для коммутационных импульсных перенапряжений в зависимости от номинального тока миниатюрных выключателей

Номинальный ток, А	2	4	6	10
Средняя амплитуда, В	208	224	201	232
Максимальная амплитуда, В	379	399	332	285
Средний уровень производной, В/мкс	33	36	21	22
Максимальный уровень производной, В/мкс	190	135	48	28

Однако, намного более серьезное событие это работа миниатюрного выключателя в случае высокого значения тока нагрузки. Это особенно важно, если номинальный ток выключателя очень низок. Как пример, измерение, сделанное, когда электроприбор был включен в цепь с миниатюрным выключателем с номинальным током 2А (рисунок В.9). Отключение тока нагрузки при этих условиях, вызывало очень высокие перенапряжения с очень большой продолжительностью и выделением высокой энергии. Максимальное перенапряжение в этом испытании составляло 2,8 кВ.

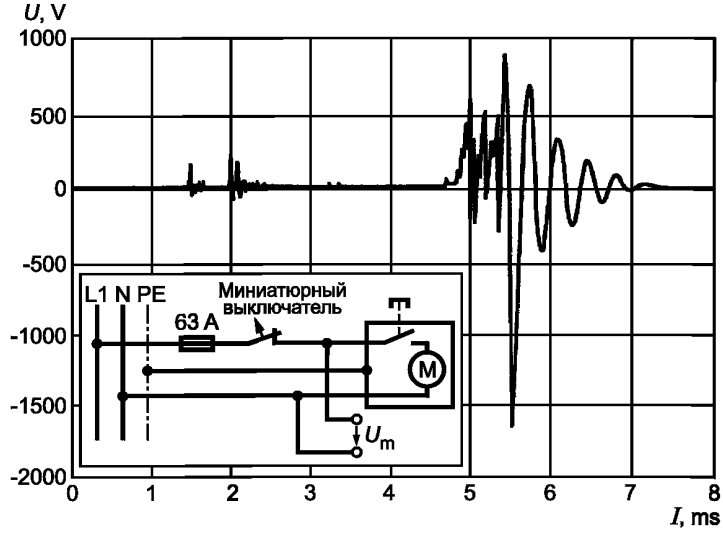


Рисунок В.9 — Испытательная схема для измерения импульсных перенапряжений при срабатывании миниатюрного выключателя при перегрузке

В.6.2 Автоматический выключатель и операции коммутации в системах электроснабжения (НН и СН)

Переходные перенапряжения, воздействующие на электрооборудование, могут наблюдаться в любой системе электроснабжения. В системах электроснабжения с линиями, проложенным в земле, почти все переходные процессы генерируются электромеханической коммутационной аппаратурой и подобным источникам. В НН и СН установках при коммутации индуктивных нагрузок, таких как: преобразователи, реакторы, обмотки контакторов и реле, подключенных в параллель к источнику электроснабжения, могут возникать коммутационные перенапряжения с амплитудой до нескольких киловольт. Однако, их частота возникновения довольно низка, так как коммутации в системах электроснабжения обычно происходят в случае повреждений или при обслуживании. Такие события очень редки, по сравнению с коммутацией нагрузок в установке потребителя. То же самое явление существует и при последовательном включении индуктивностей, таких как замкнутые контуры и последовательные реакторы, или при отключении системы электроснабжения непосредственно вместе с индуктивностью электропроводок. На стороне питания, коммутационные перенапряжения могут также быть вызваны оперативными переключениями, образованием кругового огня на коллекторе двигателя, внезапным уменьшением нагрузки электрической машины или преобразователя и оперативным переключением конденсаторных батарей, используемых для улучшения коэффициента мощности.

Частота и энергетическая способность перенапряжений данного вида могут быть значительно выше, чем атмосферные перенапряжения с точки зрения влияния на низковольтные установки. Переходные коммутационные перенапряжения в низковольтных установках может достигнуть амплитуды в несколько киловольт, хотя можно предположить, что оценка максимальных значений зависит от построения системы контроля перенапряжениями в низковольтной системе электроснабжения. В тех системах электроснабжения, где управление перенапряжением обеспечивается путем установки защитных устройств, ожидаемая максимальная амплитуда в пределах низковольтной установки потребителя не превосходит 6 кВ.

В.7 Примеры при срабатывании предохранителя

Генерации перенапряжения во время срабатывания предохранителя поясняется в разделе В.2, а пример работы миниатюрных предохранителей был приведен в подразделе 6.3. В этой части приложения В, приведены дополнительные примеры такой генерации перенапряжения.

На рисунке В.10 показано перенапряжение во вторичном распределительном устройстве 230/400В трансформаторной подстанции, при срабатывании 100 А предохранителя. Перенапряжение при коротком замыкании дает волну приблизительно треугольной формы и возникает между линейными проводниками системы. Конечно, это происходит не часто, по сравнению с перенапряжениями, вызванными, коммутацией рабочих токов.

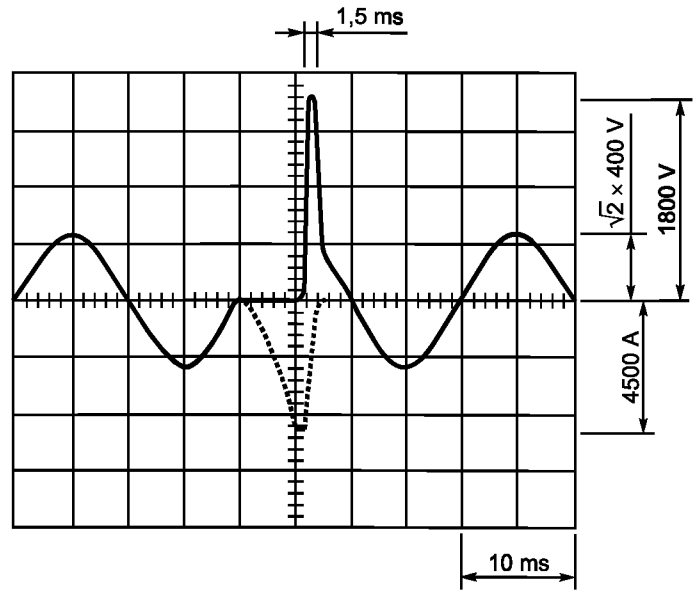
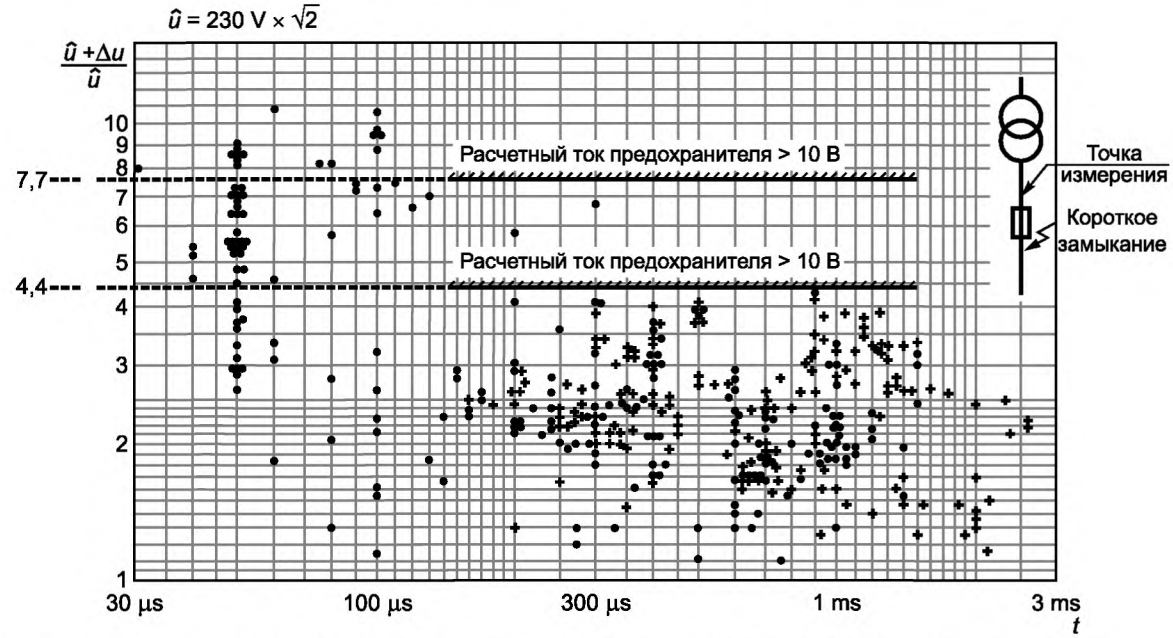


Рисунок В.10 — Пример перенапряжения во вторичном распределительном устройстве 230/400В преобразовательной подстанции при перегорании 100 А предохранителя отходящей линии

На рисунке В.11 показаны величины и продолжительность времени перенапряжений, появляющиеся на шинах в системах электроснабжения и воздействующие на подключенные нагрузки, для случая, когда короткое замыкание происходит сразу за предохранителем. Данные основаны на измерениях, полученных для множества точек измерения в различных промышленных установках.

Эти измерения выполнялись с предохранителями различных изготовителей, на токи 10 А, 35 А, 100 А и 355/400 А. Распределение результатов измерений на рисунке В.11 показывает, что чем ниже номинальный ток предохранителя, тем выше перенапряжение, но короче его продолжительность.



----- – предельное значение коммутационного перенапряжения для низковольтных предохранителей согласно стандартам на предохранитель;

• – 10 А-предохранители;

+ – предохранители > 10 А

Рисунок В.11 — Зависимость перенапряжения от продолжительности коммутационных импульсных перенапряжений в системе электроснабжения. Короткое замыкание вблизи предохранителя отходящей линии

Результаты измерений выражаются фактором перенапряжения, которым является эффективный максимум переходного перенапряжения, выраженного как кратность к номинальному напряжению питания. Фактор перенапряжения между 7,7 и 10,5 составляет только 3 % случаев измерений. Для однофазных цепей питания 230В, это означает, что в случае короткого замыкания между линейным и нейтральным проводниками, возникает перенапряжение от 2,5 до 3,4 кВ.

При трехфазном электропитании напряжением 400 В и коротком замыкании между линейными проводниками, фактор перенапряжения ниже 4,4, и следовательно перенапряжение остается ниже 2,5 кВ. Согласно стандарту на предохранители, коммутационные перенапряжения предохранителей с номинальным током больше 10 А не должен превышать 2,5 кВ. Это значение соответствует фактору перенапряжения 7,7 для напряжения питания 230 В и 4,4 для 400 В. Горизонтальные линии на рис. В.11 показывают, что указанный предел коммутационного напряжения практически выполняется в обоих случаях.

Если короткое замыкание происходит не вблизи шин, где установлен предохранитель цепи, а в удаленной точке цепи, что является более вероятным случаем, уровень коммутационных перенапряжений уменьшается за счет увеличения его продолжительности, как показано на рисунке В.12. Для каждого номинального тока были исследованы и представлены два набора данных. Они относятся к изделиям двух разных изготовителей и дают некоторую информацию относительно распределения по величине ожидаемых амплитуд и продолжительности импульсов.

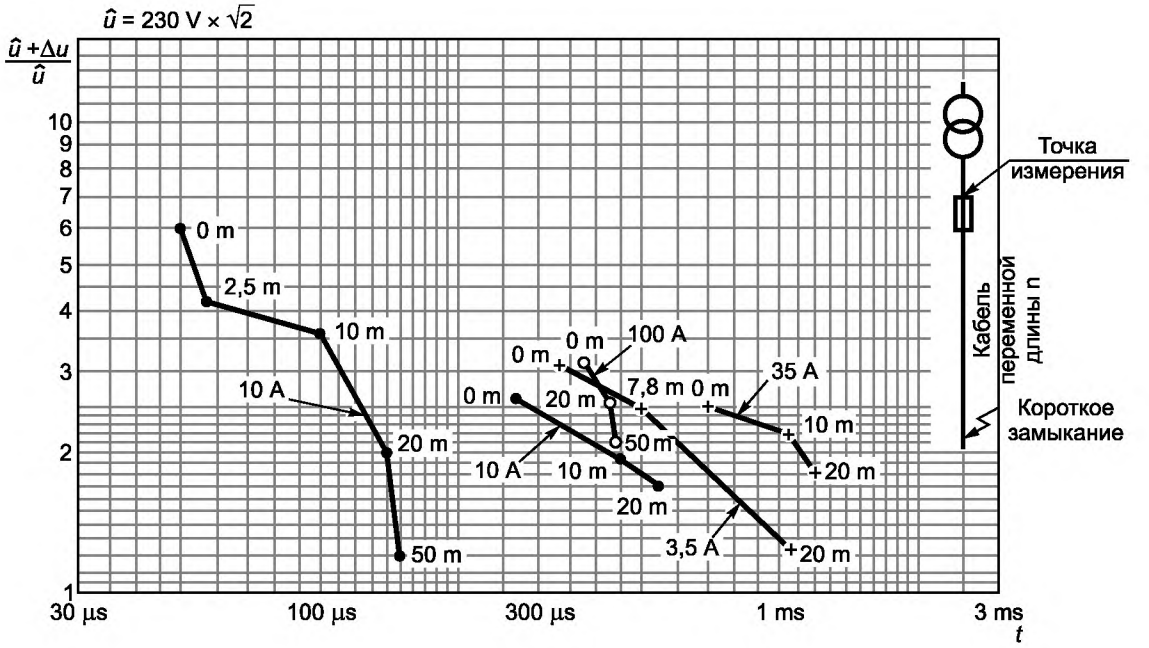


Рисунок В.12 — Перенапряжение в системе электроснабжения в зависимости от длины кабельной линии для предохранителей с различными характеристиками. Короткое замыкание в конце кабеля

Приложение С
(справочное)

Дополнительная информация о временных перенапряжениях

С.1 Временные перенапряжения, вызванные повреждениями

Одним из источников временных перенапряжений (ВПН) в системах питания НН является возникновение повреждений в системе СН. Характеристики этих ВПН зависят от типа системы питания и природы повреждений. В таблицах С.1 и С.2 суммируют возможности, обрисованные в общих чертах графически на схемах, приведенных в МЭК 60364-4-44. Таблица С.1, уже включенная в раздел 7 как таблица 6, воспроизводится здесь для удобства читателя. В ней представлены допустимые максимальные значения, как требование при проектировании установки. Эти значения — верхний предел, и практически ВПН, которые действительно происходят, вероятно, будут иметь меньшие значения. В таблице С.2 приведены максимальные значения, которые могут возникнуть в случае повреждения в системе НН.

Информация, приведенная в МЭК 60364, дополняется схемой, приведенной на рисунке С.1, представляющей Североамериканскую практику, которая не включена в текущий выпуск МЭК 60364-4-44.

Таблица С.1 — Максимальные значения допустимых перенапряжений при замыкании на землю на стороне напряжения среднего уровня

Тип и система заземления СН при единичном замыкании на землю	Система заземления согласно МЭК 60364-4-44	Максимальное действующее значение напряжения на оборудовании установок НН			Продолжительность повреждения	Максимальная продолжительность
		L-PE	N-PE	L-N	с	час
3-х проводная, изолированная нейтраль	TN, TT, IT	U_0	0	U_0	>> 5	Десятки
3-х проводная, резонансное заземление или 3-х проводная, импедансное заземление	TN, TTb) ITa), c), d)	U_0	0	U_0	>> 5	Сотни
	TTa), ITb), e)	<250 В + U_0	<250 В	U_0	>> 5	
Низко импедансное заземление (Франция)	TN, TTb) ITa), c), d)		0	U_0	<5	Сотни
	TTa), ITb), e)	<1 200 В + U_0	<1 200В	U_0	<5	
3-х проводная, непосредственное заземление	TN, TTb) ITa), c), d)		0	U_0	<5	Тысячи
	TTa), ITb), e)	<1 200 В + U_0	<1 200BV	U_0	<5	
4-х проводная, непосредственное заземление (Практика США)	TN	<2,45 U_0	0	<2,45 U_0	<5	Тысячи

Таблица С.2 — Максимальные возможные значения временных перенапряжений в низковольтных установках при повреждениях на стороне низкого напряжения

Тип отказа в системе НН	Тип системы НН	Максимальное действующее значение напряжения на оборудовании установок НН			Время отключения повреждения
		L-PE	N-PE	L-N	с
Повреждение заземления	TN		0		<5
	TT Если условие R_B/R_E <50 В/(U0-50 В) выполняется в распределительной системе	<40 V + U_0	<50 V	U_0	> 5, если отказ происходит в системе распределения
		<V3 U_0		U_0	< 5, если отказ происходит в установке потребителя
	TT Если условие R_B/R_E <50 V/(U_0-50 V) не выполняется в распределительной системе[b]	<1,45 U_0	<U,/2	U_0	> 5, если отказ происходит в системе распределения
			U_0	U_0	< 5, если отказ происходит в установке потребителя
	IT		U_0		>> 5
L-N короткое замыкание	TN	<1,45 U_0	0	<1,45 U_0	<5
	TT	U)	<U_0/2	<1,45 U_0	
	IT	U)	<U_0/2	<1,45 U_0	
Обрыв нейтрали	TN, TT		<U_0	<V3 U_0	> 5

Примечание 1. В некоторых странах между системами TT делается различие:

[a] система TT с заземленным нейтральным проводником

[b] система TT, где нейтральный проводник не заземляется

где

R_B — полное сопротивление заземления нейтрального проводника в низковольтной системе;

R_E — самое низкое сопротивление заземления, которое будет ожидаться для проводящих частей, которые не соединяются с защитным проводником, в случае повреждения заземления;

50 В стандартный предел напряжения прикосновения;

U_0 — номинальное напряжение относительно земли в низковольтной системе.

Примечание 2. В IT-системах, максимальные действующие значения напряжения, из-за повреждений в системах СНк и из-за повреждений в системах НН LV должны быть увеличены, поскольку они имеют большую продолжительность.

Как пример, для трехпроводной системы СН с резонансным заземлением, с временем замыкания на землю более 5 с,и для системы НН с временем замыкания на землю более 5 с, максимумальное действующее значение напряжения, может быть равно или меньше чем 250 В + $\sqrt{3}$ U_0 для напряжения L-PE.

Примечание 3. ВПН из-за обрыва нейтрали в системе НН может быть проигнорировано при выборе УЗИП, потому что нет оборудования, которое должно противостоять такому напряжению. Однако, такое ВПН может уничтожить УЗИП, если, конечно, нормальные критерии выбора УЗИП были соблюдены, то есть, что режим повреждения был расчетным.

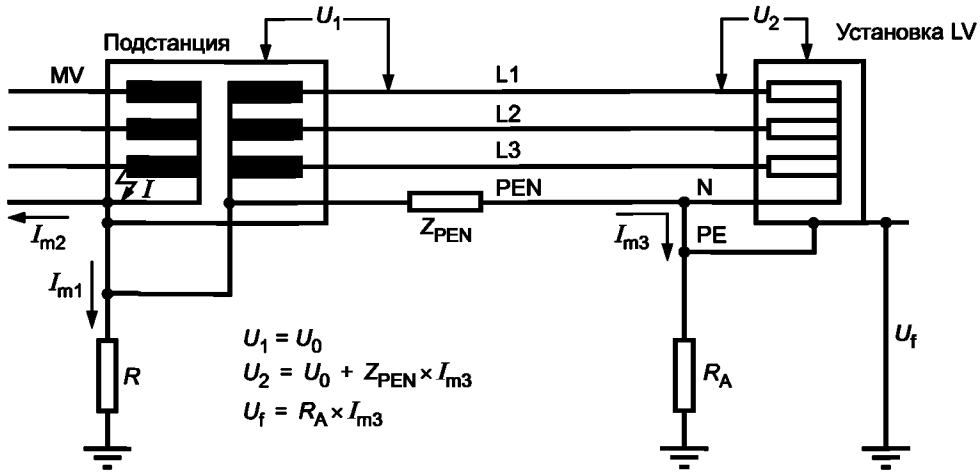


Рисунок С.1 — Временное перенапряжение, при повреждении на первичной стороне трансформатора в системе TN согласно североамериканской практике

С.2 Совмещение систем

В ряде случаев в системах электроснабжения, получающих питание от воздушных линий, используются общие опоры для разных уровней напряжения. Эта непосредственная связь может привести к совмещению двух систем, если провода линии одной системы упадут на провода линии другой системы. Этот несчастный случай, который может произойти во время штормов или когда неконтролируемый механизм сбивает опору, значим для некоторых применений. Подобная ситуация, но с намного меньшей вероятностью может произойти в точках пересечения двух линий. Это условие может также существовать в проложенных под землей системах электроснабжения, где используется практика неупорядоченной прокладки (кабели питания, и коммуникационные кабели уложены в одной траншее).

В зависимости от схем защиты от перенапряжения, реализованных в системе электроснабжения, у этого совмещения могут быть пагубные последствия для оборудования, соединенного с нижним уровнем напряжения. Обычные разрядники не могут выдержать воздействие в течение относительно длительного времени (несколько периодов) действия повышенного напряжения на частоте питания до отключения линии. Действительно, эта неспособность разрядника рассеять энергию, связанную с этим перенапряжением, приводит к разрушению разрядника, но инициирует электрическую дугу, которая эффективно обеспечивает ограничение напряжения ниже защитного уровня разрядника.

Этим способом оборудование потребителя, соединенное с низковольтной системой, могло бы быть защищено, хотя бы за счет разрядника, который уничтожается и должен быть заменен. Эта замена представляет небольшие расходы по сравнению со стоимостью восстановления опор и оборванных линий. По сравнению с массовым отказом оборудования на низковольтной стороне, которая иначе произошла бы, схема защиты с потерей одного разрядника – опция, которая была рассмотрена и применена несколькими электроэнергетическими компаниями.

Как пример совмещения, рассмотрим объект, где линия электроснабжения 23 кВ (линия относительно земли 13,9 кВ) смонтирована выше линии на 4,16 кВ. Если провод 23 кВ случайно связывается с проводом на 4 кВ, то фактор перенапряжения на этом проводе составит 5,5. Смонтированная на деревянных траверсах линия на 4,16 кВ может легко противостоять этому перенапряжению, таким образом, передавая 13,9 кВ на распределительный трансформатор, запитанный от этой линии. Наличие разрядников на трансформаторе и насыщение трансформатора, ограничивают перенапряжения на стороне НН трансформатора в достаточной степени, чтобы избежать серьезного повреждения соединенного НН оборудования. Анекдотические сообщения, однако, говорят, что в некоторых случаях произошли массовые отказы оборудования. Эта ситуация могла бы быть объяснена несоответствующими методами заземления трансформатора и нейтрали.

Приложение D
(справочное)

Дополнительная информация о системных перенапряжениях

D.1 Общие вопросы

Электронное оборудование, которое входит в бытовую и деловую среду все больше, часто включает коммуникационный порт так же как обычный порт шнура питания. Типичный пример персональный компьютер (ПК) с модемным соединением. Хотя и питание, и коммуникационные системы могут включать цепи защиты от импульсных перенапряжений, скачки тока в системе, вызывают сдвиг потенциала его контрольной точки, в то время как потенциал другой системной контрольной точки остается неизменным. Различие потенциала между этими двумя контрольными точками появляется между двумя портами ПК. В зависимости от типа ПК/модема и его защищенности, которая часто не определена, это различие потенциала может привести к некоторым нарушениям в работе или повреждениям.

Были предложены различные схемы для уменьшения нарушений в работе или повреждений из-за разности потенциалов. Самым эффективным было бы оптическое разъединение, вставленное в линию связи, но расходы и встройка нежелательны для типового применения в бытовых условиях. Увеличение защищенности системы ПК со стороны изготовителей, учитывая рыночную экономику, вряд ли произойдут, и фактически они не эффективны для некоторых из напряжений, которые могут появиться. Следующий пример, из опыта Северной Америки (в этом примере рассмотрены линии, типичных для телефонии), иллюстрирует проблему, которой, в зависимости от определенных национальных методов, можно встретить в других установках.

Примечание — Для защиты телекоммуникаций и сигнальных линий используют металлические проводники системы молниезащиты, включая системные взаимодействия. Рассматривают следующие линии:

- телекоммуникационные линии, соединяющие коммутатор с сетевым окончанием;
- телекоммуникации или сигнальные линии, соединяющие оборудование, расположенное в различных зданиях, например, линии ISDN или сигнальные линии между компьютерами.

D.2 Пример смещения потенциала ПК/модема

На рисунке D.1 показан ПК, оборудованный модемом, подключенный к сети трехпроводным кабелем, который включает проводник заземления, устанавливающий потенциал шасси равным потенциалу заземляющей шины распредустройства. Модем соединяется с телефонным выходом в комнате и на входе телефонной связи имеется дополнительная защита от перенапряжений, установленная телефонной компанией. Для худшего варианта (часто встречаемого) электрический и телефонный ввод входят в дом с противоположных концов. В этом случае, проводник заземления защиты входа соединяется с самой близкой точкой заземление системы, которая доступна, как показано на рисунке. Этот дополнительный проводник заземления может быть непосредственно подключен к распределительному шкафу.

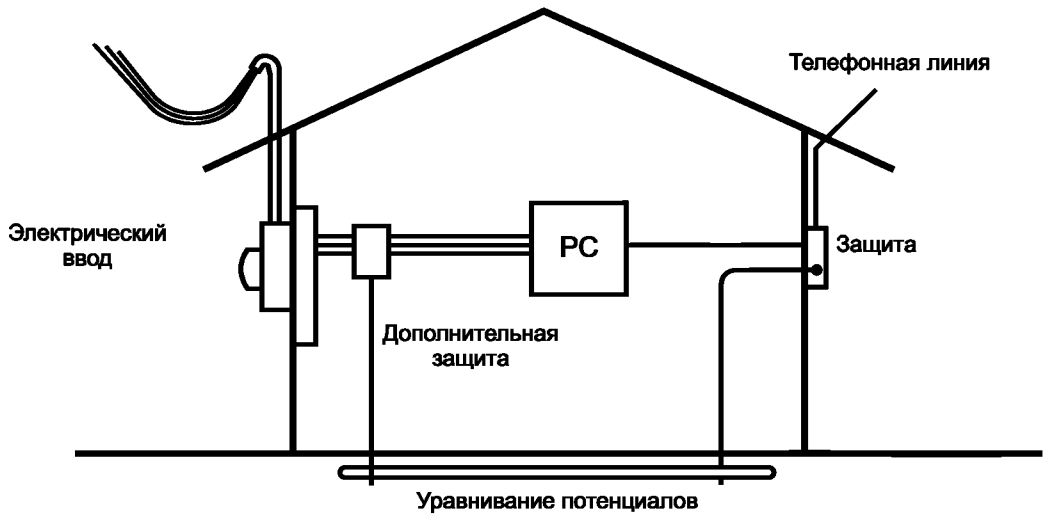


Рисунок D.1 — Соединение ПК/модема с системой питания и коммуникационной системой

Как приведено ниже эта альтернативная маршрутизация не имеет значения при импульсном воздействии на телефонную связь. Устройство защиты от импульсных перенапряжений со стороны питания ПК на рис. D.1, откуда пользователь ожидает появления возмущений с наибольшей вероятностью, рассматривается как дополнительное. В действительности наличие УЗИП на стороне питания не оказывает никакого эффекта на результат рассматриваемого сценария.

На рисунке D.2 приведен сценарий, при котором импульсное перенапряжение от телефонной сети воздействует на ввод питания при условии, что телефонная компания установила специальный УЗИП, являющийся частью установки. Такое устройство упоминается как Сетевое интерфейсное устройство (NID)[1]. Импульсное перенапряжение отводится NID через проводник уравнивания потенциалов на заземлитель. В худшем случае, два вода располагаются в противоположных концах дома, поэтому у соединения для уравнивания потенциалов может быть существенная длина. Наличие УЗИП на стороне питания не имеет никакого значения для этого сценария, на рисунке D.2 приведен УЗИП, установленный потребителем, и ограничитель перенапряжения, например, в распредустройстве или шкафе учета.

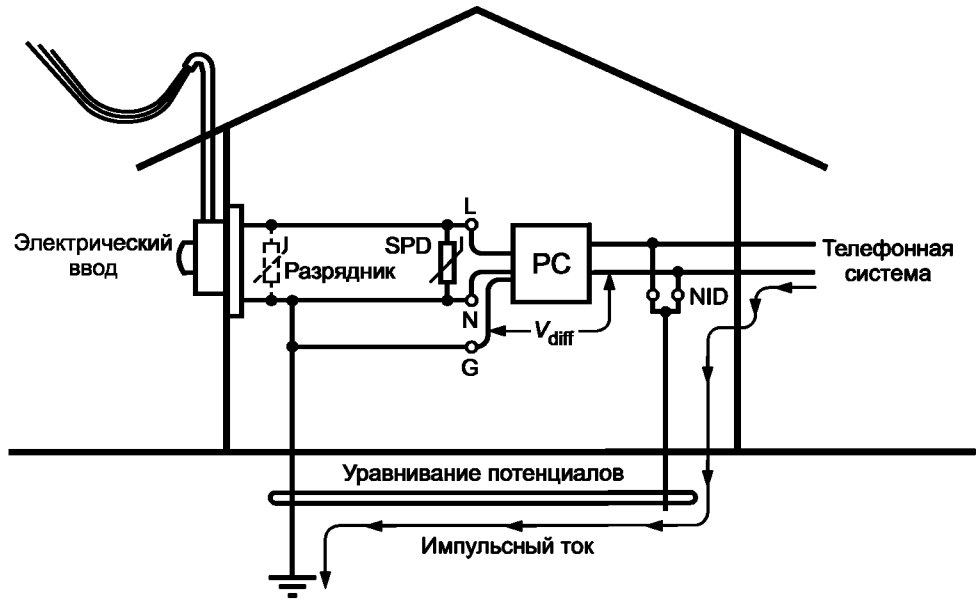


Рисунок D.2 — Разность потенциалов на ПК/модеме во время импульса тока

Текущий "импульсный ток" на рисунке D.2 течет по трубе, создавая магнитный поток в замкнутом контуре, сформированным трубой и проводниками в верхней части цепи — телефонный провод, соединяющий ПК с NID и ответвления, соединяющего ПК с входом питания. Быстро изменяющийся импульсный ток вызывает напряжение в контуре, которое появляется в точке, где контур разомкнут — изоляция между модемными терминалами и терминалами питания ПК.

Другой способ объяснить вызванную разность потенциалов, основанный на том же самом электромагнитном законе, предполагает, что у длинного канала есть индуктивность L, что приводит к возникновению напряжения L x di/dt, которое возникает вдоль канала и следовательно прикладывается к портам ПК. Однако объяснение, основанное на потокосцеплении, более полезно, потому что оно указывает на влияние геометрии контура, а не только на длину канала. Теоретически, если контур чрезвычайно узкий — прокладка проводов близко к проводнику заземления (что рекомендуется с точки зрения обеспечения ЭМС — см. приложение F), его область была бы незначительной и потокосцепление, значительно уменьшено. В действительности, однако, площадь контура в реальной установке всегда будет существенной.

В приведенной схеме разность потенциалов появляется между любым из двух телефонных проводов на одной стороне ПК и нейтральным проводником N или проводником заземления G с другой стороны ПК, при несрабатывании УЗИП или разрядника, присутствие УЗИП на стороне порта питания ПК не оказывает никакого влияния на результат при этом сценарии импульсного перенапряжения, поступающего от телефонной станции и оказывающем отрицательное воздействие при его отводе нормально функционирующим NID.

[1)] NID устанавливается телефонной компанией, для защиты ее внешнего оборудования от перенапряжений или импульсов возникающих в цепях абонента. Это не обеспечивает защиты абонента от импульсных перенапряжений, хотя может показаться, что защищает. Однако NID учитывается в этом сценарии импульсного перенапряжения.

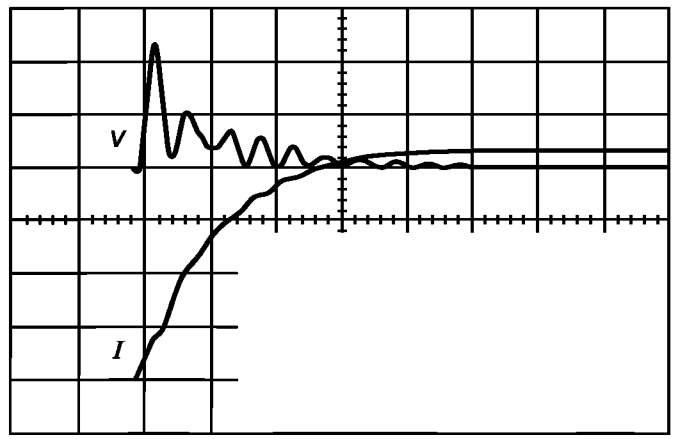
Подобным образом импульсное перенапряжение со стороны питания и не отведенное в точке ввода, может достигнуть точки подключения ПК, где благоразумный домовладелец установил УЗИП для защиты от импульсных перенапряжений со стороны линии электропередачи.

Здесь снова возникает тупиковая ситуация, когда ток импульсного воздействия, отведенный УЗИП, возвращается через землю и проводник заземления или/и нейтральный проводник. Этот импульсный ток создает магнитный поток в том же самом контуре, как и в первом сценарии, с тем же самым возможным результатом повреждения или разрушения.

D.3 Пример восстановительных действий

Для демонстрации побочного эффекта от нескоординированной защиты от перенапряжения и преимущество предложенного решения, измерения проводились для копии полномасштабной внутренней электропроводки системы, включая питание, телефон и медную водопроводную трубу, рисунок D.2. Телефонные провода проложены стандартным способом на некотором расстоянии от трубы.

Рисунок D.3 показывает запись, полученную при воздействии стандартного импульса перенапряжения на NID, определенного стандартами по телефонии. Измерение проводилось для разомкнутого контура для импульса с параметрами изменения импульсного тока 75 А/мкс, амплитудой 4,3 кВ. В фактической установке это напряжение появилось бы между двумя портами присоединенного ПК, но в эксперименте они не были соединены, чтобы избежать бесполезного повреждения.



I Входной ток NID 50 A/div: *di/dt* = 75 А/мкс
V Напряжение между телефонным портом и защитным проводником (PE) 2 кВ/дел: максимум 4,3 кВ.
Горизонтальная развертка: 2 мкс/дел

Рисунок D.3 — Напряжение в контрольных точках для ПК во время импульсного перенапряжения

Рассмотрение рисунка D.3 указывает на существенный факт: максимальное напряжение достигается во время прохождения переднего фронта импульсного тока, а не во время достижения максимального значения тока. Таким образом, максимальная амплитуда определяется начальным значением производной, а не максимальным значением самим по себе. Этот индуктивный эффект является другим примером для комментария сделанного несколько раз в этом техническом отчете, что, рассмотрение средней скорости нарастания тока, вычисленной для 10 % и 90 % точек, может ввести в заблуждение. Этот эффект вероятен даже для медленно возрастающего импульса, потому что газовый разряд в NID не будет возникать прежде, чем импульс достиг высокого напряжения, что приведет к увеличению производной по сравнению с тем, если бы ток начал течь в начале импульсного перенапряжения. Этот пример также показывает как цепь, в которой используется газоразрядная трубка, может действовать как генератор более крутых передних фронтов, чем у исходного импульсного перенапряжения. В этом случае, этот эффект будет смягчен коррекцией напряжений взаимодействия, как описано ниже.

Если контур дополнительно замкнуть кроме как по изоляции между двумя портами ПК, то между ними не появится никакого напряжения, и ПК не будет находиться под угрозой сбоя. Замыкание контура может быть выполнено гибридным многопортовым УЗИП, называемым эквалайзером, и установленный между колодкой питания и телефонной колодкой, в который вставлен шнур питания и телефонный ввод от ПК. На рисунке D.4 изображено такое подключение.

Чтобы иллюстрировать эффективность данного решения, на рисунке D.5 показано уменьшение напряжения полученного для схемы на рисунке D.4, но со вставкой стандартного эквалайзера (продаются во многих магазинах электроники, но не обязательно под этим названием, см. подраздел 3.17) между питанием и телефонной линией в точке соединения ПК.

Универсальная конструкция такого устройства включает розетку на два телефонных провода, две соответствующие газоразрядные трубки, два добавочных резистора, и два кремниевых лавинных диодов, с непосредственной связью или через соответствующий УЗИП, чтобы создать эффект полного или почти полного заземления.

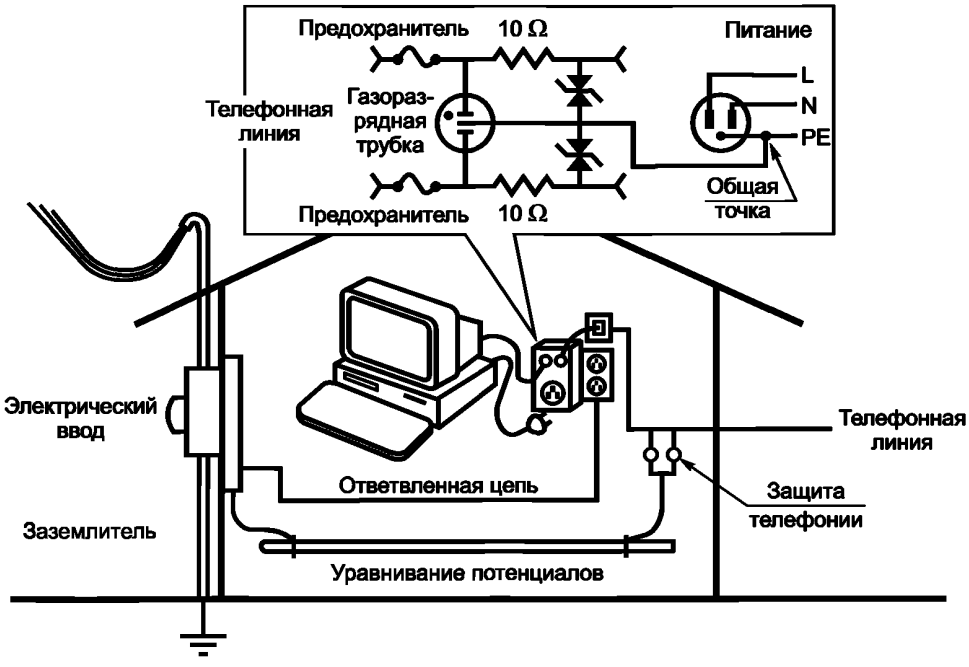
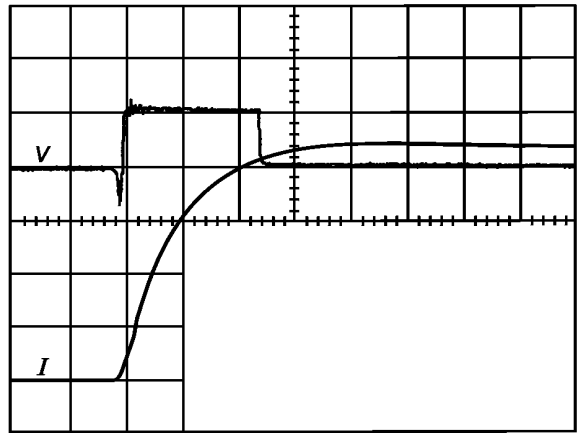


Рисунок D.4 — Установка согласующего эквалайзера в портах ПК/модема



I Входной ток NID 50 A/div: d//d* = 75 A/us
V Напряжение между телефонным портом и защитным проводником (PE) 200 В/дел: максимум 200 В
Горизонтальная развертка: 2 мкс/деление

Рисунок D.5 — Уменьшение разности потенциалов между портами согласующим эквалайзером

На рисунке D.5 можно видеть, что за счет действия диодов происходит снижение напряжения до 200 В от 4,3 кВ, показанных на рисунке D.3, сопровождающимся дальнейшим снижением напряжения после срабатывания газоразрядной трубки, которое происходит с задержкой в 5 мкс.

Согласующий эквалайзер будет обладать подобными преимуществами и в случае импульсного перенапряжения со стороны системы питания. Тонкие различия могут быть в том, что в первом сценарии, двухпроводная сбалансированная телефонная цепь эффективно соединяется с системой заземления действием NID, непосредственно создавая проблему. Во втором сценарии, двухпроводная телефонная линия остается гальванически изолированной от системы заземления до возникновения газового разряда в NID, не со стороны телефонной линии. Даже если NID не срабатывает, то существует достаточная емкость между каждым из телефонных проводов и землей, чтобы в начальной стадии импульсного перенапряжения иметь потенциал этих двух проводов равным потенциалу земли и таким образом иметь потенциал отличный относительно порта питания. В результате опасность могла бы быть менее существенной, но все же, когда большие разности потенциалов вызывают искровой разряд NID, согласующий эквалайзер оказывает уравнивающее действие для обоих сценариев.

Меньший замкнутый контур существовал бы, если бы ввод телефона и питания были в одном конце здания, что является практической рекомендацией. При такой конфигурации, как показывают испытания, снижение напряжения составляет до 75 %, по сравнению с большими замкнутыми контурами, но все еще имеется потенциальный риск для аппаратных средств, так, что согласующий эквалайзер полезен и в этом случае.

Приложение Е
(справочное)

Дополнительная информация о применении УЗИП

Е.1 Реализация принципов координации

Для реализации координации УЗИП возможны две схемы:

a) координация без дополнительного элемента разъединения. Эта схема использует проводное соединение установки как разъединяющий элемент:

- тип, ограничивающий напряжение, основанный на характеристике тока/напряжения УЗИП и падении напряжения в проводном соединении;
- тип, коммутирующий напряжение, основанный на динамическом падении напряжения в проводном соединении и напряжении пробоя УЗИП.

b) координация при помощи разъединяющихся элементов.

В целях координации возможно использование индуктивностей или сопротивлений как разъединяющих элементов, у которых должна быть достаточная защищенность от импульсных перенапряжений:

- индуктивности, как правило, используются в системах электроснабжения;
- сопротивления, как правило, используются в телекоммуникационных системах.

Е.2 Координация между УЗИП ограничивающим напряжение

Е.2.1 Принцип действия

Энергетическая координация двух УЗИП без разъединяющих элементов может быть получена подбором их характеристик ток/напряжение для соответствующего диапазона токов. Для формы волны половинной длительности (например, 10/350мкс), индуктивность не очень эффективна. Если это возможно, то следует обеспечить координацию за счет применения резистивных элементов разъединения (или собственного сопротивления кабелей). В схемах питания, однако, вставка рассеивающего мощность сопротивления ограничена применением в низковольтных цепях питания, таких как питание электронных устройств.

Если индуктивность используется в качестве разъединяющих элементов, пример приведен на рисунке Е.1, необходимо учесть форму волны импульсного тока (например, 10/350 мкс, 8/20 мкс). Пример приведен в этом приложении ниже.

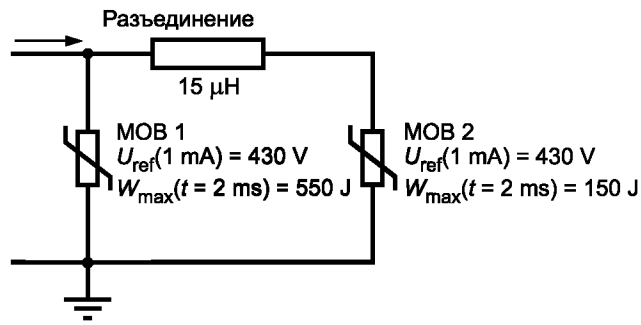


Рисунок Е.1 — Пример координации для двух ограничивающих напряжение УЗИП (МОВ1 и МОВ2)

При координации двух ограничивающих напряжение УЗИП, например металлических окисных варисторов (МОВ), оба УЗИП должны быть выбраны для соответствующего импульсного перенапряжения, согласно их *I/V* характеристики (см. рисунок Е.2). Длительность волны не будет значительно сокращена, по сравнению с воздействующим током, как показано на рисунке Е.3, на котором представляет случай применения МОВ. Для того чтобы увеличить воздействующие токи, энергия рассеивалась в МОВ как показано на рисунке Е.4. Как можно заметить, в этом примере, знаний только об относительном напряжении U_{ref} МОВ не достаточно, чтобы установить координацию. Необходимы дальнейшие вычисления, как детализировано в разделе Е.6.

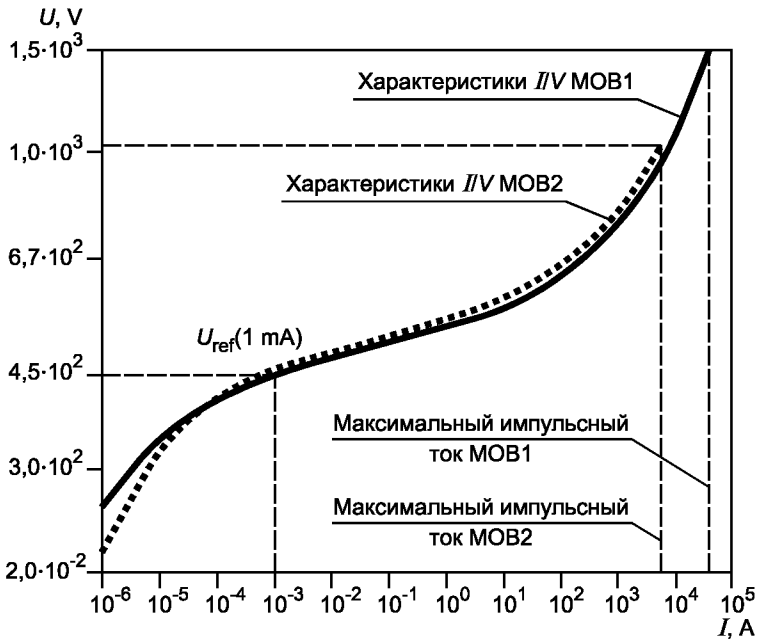


Рисунок Е.2 — Сравнение вольтамперных характеристик двух МОВ

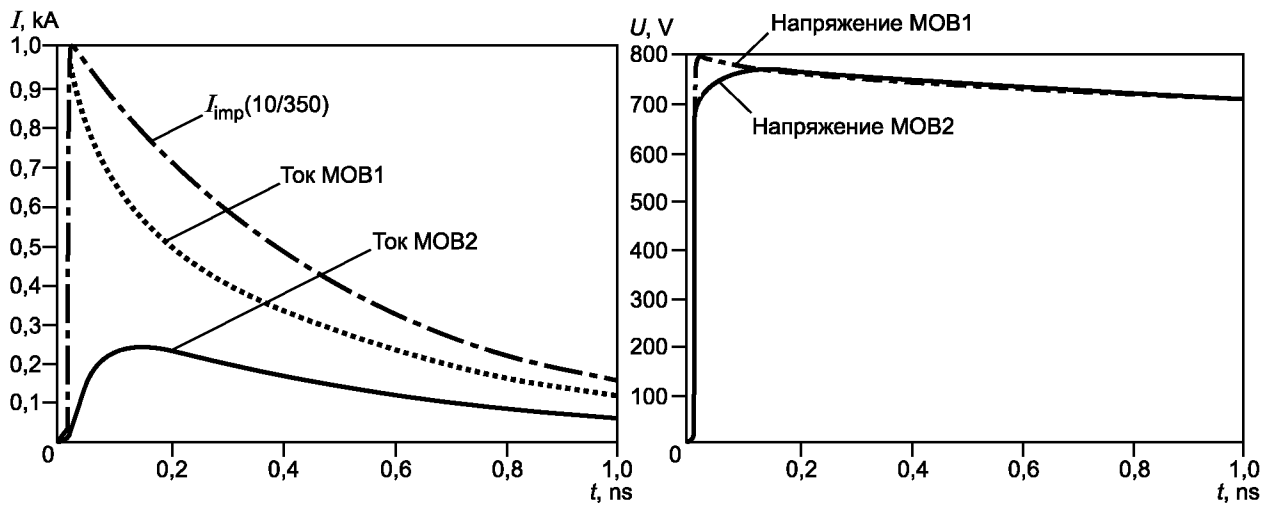


Рисунок Е.3 — Зависимости тока и напряжения от времени для двух ограничивающих напряжение УЗИП

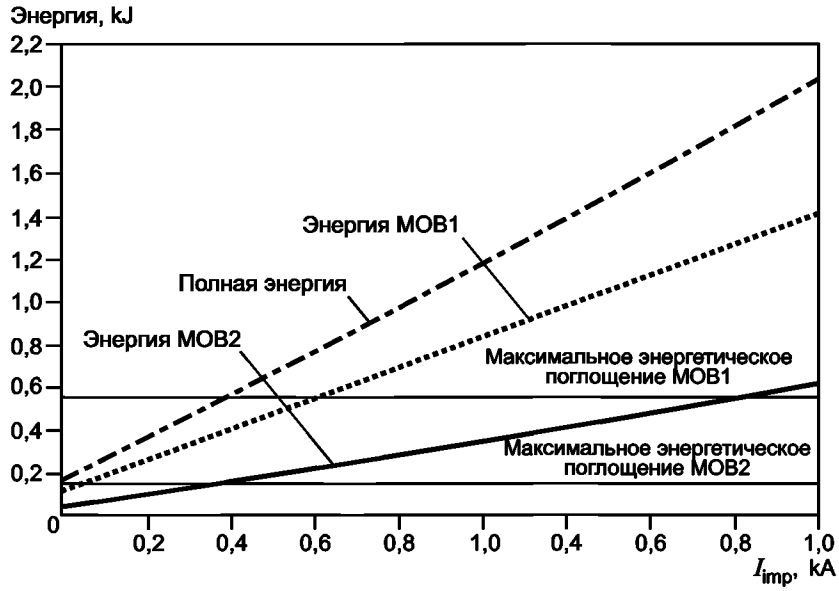


Рисунок Е.4 — Распределение энергии между двух ограничивающих напряжение УЗИП при воздействии тока

Чтобы иллюстрировать эти взаимодействия, вычисления выполнялись для простой схемы, показанной на рисунке Е.5. В этой схеме, два ограничивающих напряжение УЗИП (варисторы) с идеальными характеристиками по напряжению, устанавливаются в узле 1 и узле 2. Заданный уровень защиты должен быть 2,5 кВ (U_{p1}) в узле 1 и 1,5 кВ (U_{p2}) в узле 2. Длина проводного соединения между УЗИП принята приблизительно 10 м., с полной индуктивностью 10 мкГн. Для вычислений использована модель с импедансом (300 Ом) и длиной проводного соединения 10 м. Это дает полную емкость проводного соединения приблизительно 100 пкФ.

В действительности возникают импульсы с различными формами волны. Для рассмотрения были выбраны два грозовых импульса: короткий импульс 2/20 мкс и стандартизированный 10/350мкс в соответствии с МЭК 61312. Для простоты приняты волны треугольной формы. Каждый импульс поочередно был введен сначала в узле 1, затем, в узле 2.

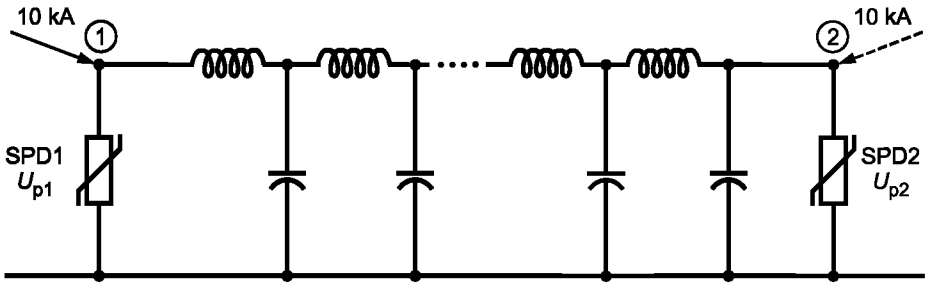


Рисунок Е.5 — Идеализированный пример для иллюстрации вопросов координации УЗИП

На рисунке Е.6 приведены расчетные напряжения и токи для импульса 2/20мкс введенного в узле 1. Для этого относительно короткого импульса основное токовое воздействие приложено к УЗИП 1.

Напряжение U_{p1} определяется как:

$$U_{p1} = U_{p2} + L(dI_{p2}/dt), \quad (Е.1)$$

где

I_{p2} — ток в УЗИП2;

U_{p2} — напряжение на УЗИП2 при токе I_{p2}.

Соответственно, это напряжение U_{p1} отрицательно в хвосте тока I_{p2}, где производная тока отрицательна (см. рисунок Е.6).

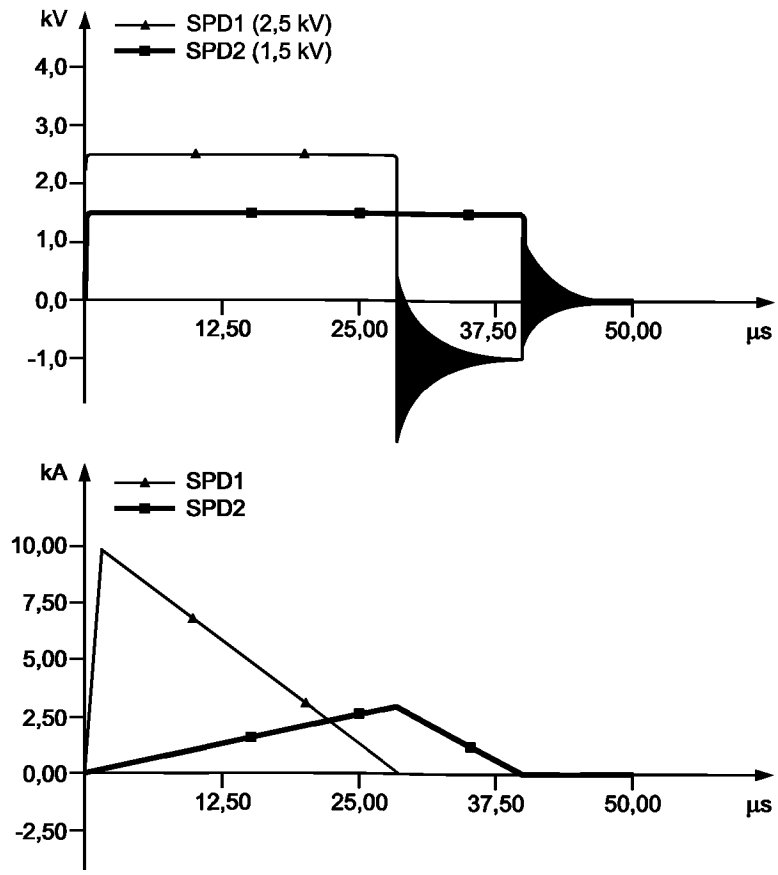


Рисунок Е.6 — Расчетные напряжение и ток УЗИП для импульса тока 2/20 мкс, введенного в узле 1

После резкого изменения di/dt для этого идеализированного примера, высокочастотные колебания (вызванные) происходят для напряжения, особенно в узле 1, из-за собственной емкости проводного соединения (рисунка Е.5). В хвосте тока через УЗИП d*i*/d*t* — приблизительно равно 0,25 кА/мкс. Соответственно, напряжение в узле 1 скачкообразно изменяется от значения 2,5 кВ (U_{p1}) к новому максимальному значению, как определено по (Е.1):

$U_{p1} = U_{p2} + L(dI_{p2}/dt)$ = 1,5 кВ + 10 мкГн х (–0,25 кА/мкс) = 1,0 кВ, исключая начальные колебания, которые накладываются на это значение.

Рисунок Е.7 показывает соответствующие напряжения и токи для воздействия импульса 10/350 мкс, введенным в узле 1. Для этого импульса большой продолжительности, большая часть тока и энергетическое воздействие приложены к УЗИП2 из-за его более низкого уровня защиты. Для сравнения, вычисления были повторены для случая, где ток вводится в узле 2. Было определено, что фактически весь ток был отведен через УЗИП2.

Этот пример показывает, что продолжительность текущего импульса имеет существенное значение для распределения тока и энергии между УЗИП с различными защитными уровнями. Если в установке имеется больше чем одно УЗИП, то УЗИП с более низким защитным уровнем (например, в оборудовании), в целях предосторожности, не должен подвергаться существенным воздействиям.

Как будет рассмотрено позже в этом разделе, одна из возможностей состоит в том, чтобы добавить разъединяющийся элемент между УЗИП. Чтобы иллюстрировать эту возможность, пример с импульсным током 10/350мкс был повторен с индуктивностью 100 мкГн, как разъединяющего элемента. На рисунке Е.8 приведен результат этого моделирования. В этом случае больший ток течет через УЗИП, но все еще есть довольно серьезное воздействие на УЗИП2.

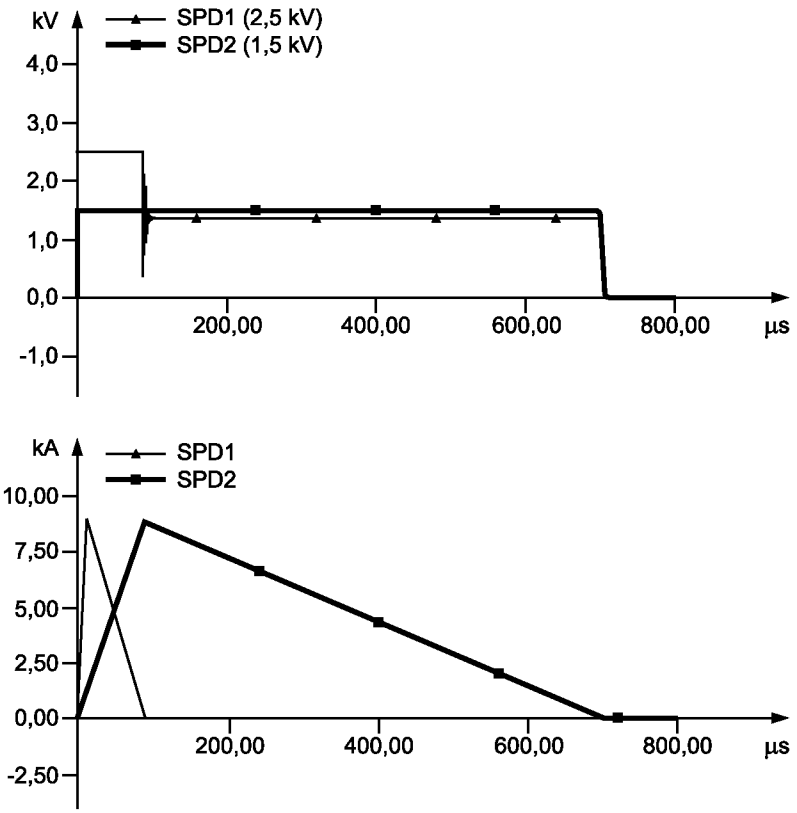


Рисунок Е.7 — Расчетные напряжение и ток УЗИП для импульса тока 10/350 мкс, введенного в узле 2

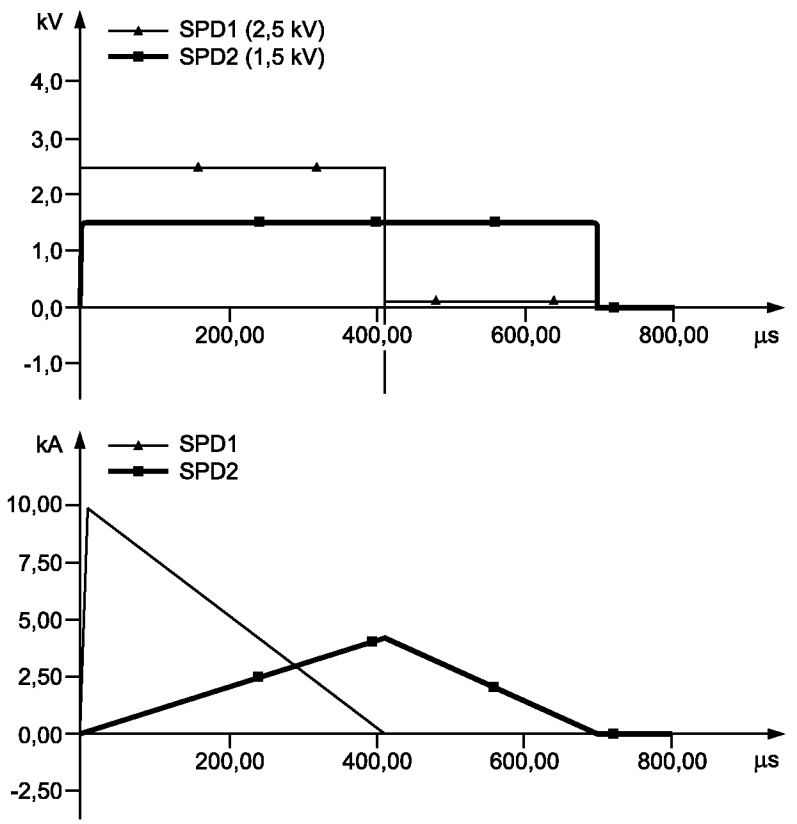


Рисунок Е.8 — Расчетные напряжения и ток УЗИП для импульса тока 10/350 мкс, введенного в узле 1

Е.3 Координация между УЗИП, коммутирующим напряжение и УЗИП ограничивающим напряжение

Е.3.1 Принцип действия

На рисунок Е.9 приведена основная схема для этого вида координации. Пробой разрядника (УЗИП1) зависит от суммы остаточного напряжения U_{ref} на МОВ (УЗИП2) и динамического падения напряжения на разъединяющем элементе U_{DE}.

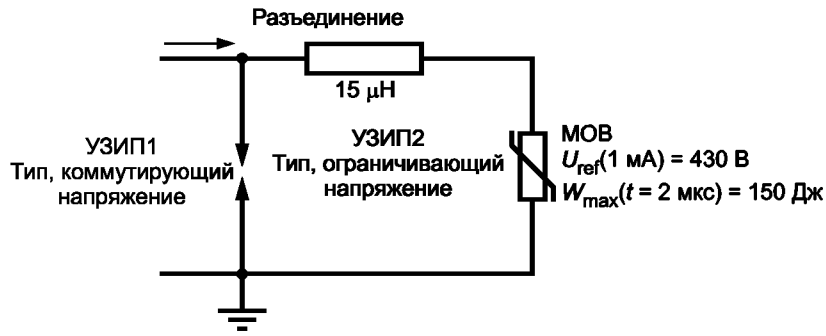


Рисунок Е.9 — Пример координации между коммутирующим напряжение УЗИП и ограничивающим напряжение УЗИП

До пробоя, распределение напряжений между УЗИП определяется отношением (Е.2):

$$U_{SG} = U_{res} + U_{DE}, \quad (E.2)$$

где

U_{SG} — напряжение на разряднике;

U_{res} — напряжение на УЗИП 2 для импульсного тока i;

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

Когда U_{SG} превышает динамическое пробивное напряжение на разряднике, — координация достигнута. Это условие зависит только от

- характеристики МОВ (например, U_{ref} (1 мА); W_{max} (t = 2 мс);
- скорости изменения тока воздействующего импульса;
- характера разъединяющегося элемента (индуктивность в этом примере);
- динамическое пробивное напряжение разрядника.

Примечание — Для конкретного объекта задача состоит в том, чтобы получить разряд на ранней стадии при повышении импульсного тока. А это — фактический уровень повышения di/dt, который определяет работу схемы, а не средняя скорость повышения, вычисленного как $\Delta I/\Delta T$. В конкретных схемах максимальный уровень изменения происходит во время повышения, где-нибудь между 10 %-ми и 90 %-ми точками определяющих время повышения. Если использовать $\Delta I/\Delta T$ вместо фактического значения di/dt, то полученные оценки могут быть чрезмерно пессимистичным. См. таблицу Е.1 для сравнения между точными вычислениями и грубыми оценками, основанными на использовании $\Delta I/\Delta T$, дальнейшее обсуждение этой проблемы приведено в пункте Е.7.4.

Возможны два результата, в зависимости от соответствующих параметров УЗИП, импульсного тока и разъединяющего импеданса:

a) нет пробоя разрядника, "мертвая точка".

Весь импульсный ток течет через МОВ. Поэтому, МОВ должен иметь определенную энергоемкость относительно, выделяемой энергии, от действия этого импульсного тока (см. рисунок Е.10).

b) есть пробой разрядника.

Пробой разрядника изменяет форму волны импульса, воздействие которой определяет ток, отводимый МОВ.

Как можно увидеть на рисунке Е.11, продолжительность тока в МОВе значительно уменьшается. Если разрыв происходит с низким напряжением на дуге, выбор U_c следующего (отводимый ток) МОВ не важен с точки зрения координации с разрядником.

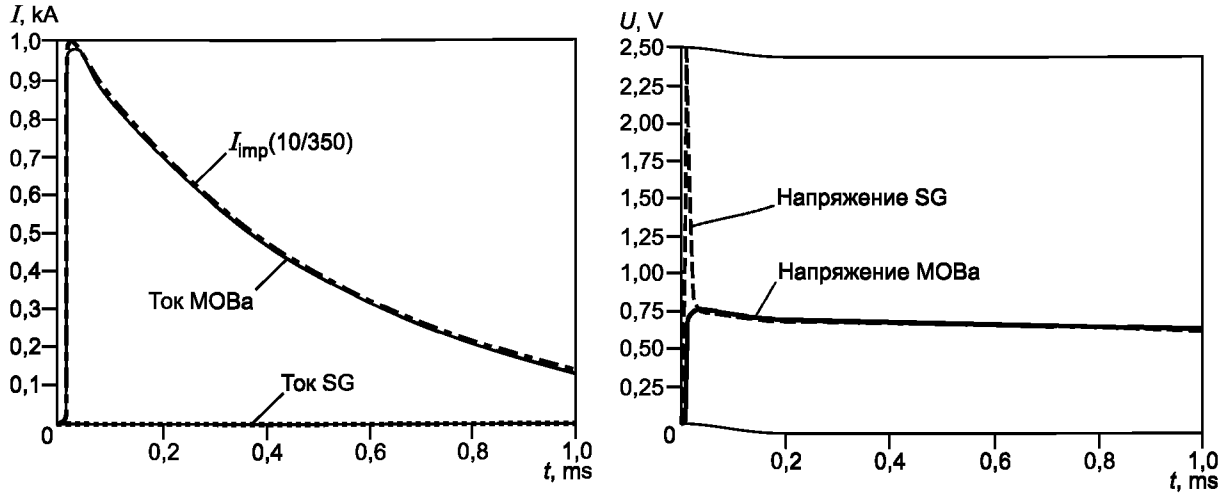


Рисунок Е.10 — Характеристики тока и напряжения для схемы рис. Е.9 при отсутствии пробоя

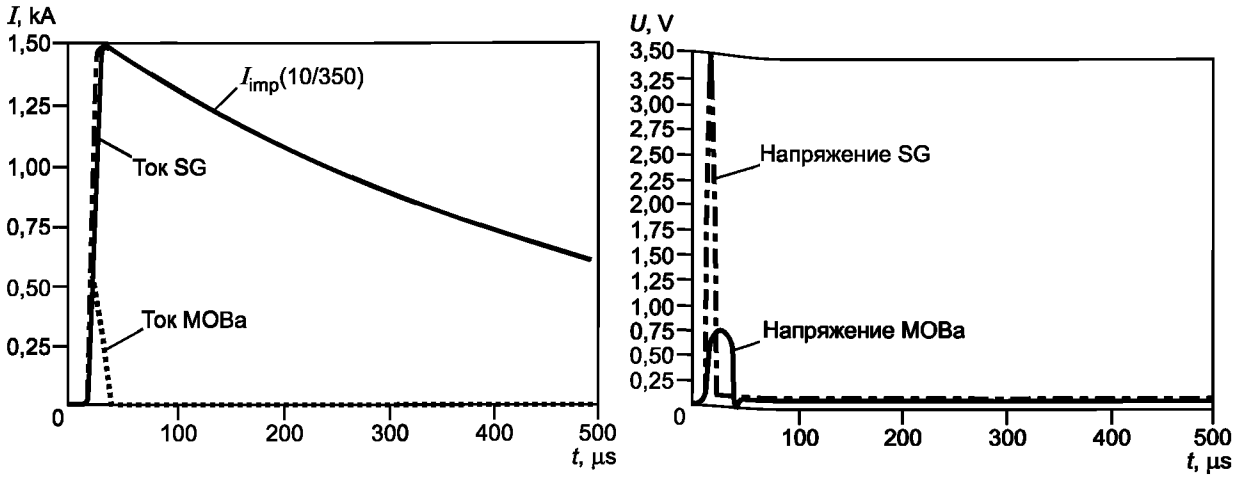


Рисунок Е.11 — Характеристики тока и напряжения для схемы рис. Е.9 при пробое

Е.3.2 Определение необходимых параметров разъединяющегося элемента

В качестве примера на рисунке Е.12 показан разрядник (SG), на который воздействует импульс с параметрами 1 кА, 10/350 мкс и пять вариантов для отвода тока УЗИП от a) до e). Наиболее значимым для выбора разъединяющегося элемента является режим короткого замыкания a). Однако этот случай, с точки зрения координации, не интересен. Более реален как наиболее значимый режим наличия напряжения или противонапряжения на стороне нагрузки, вариант c) на рисунке.

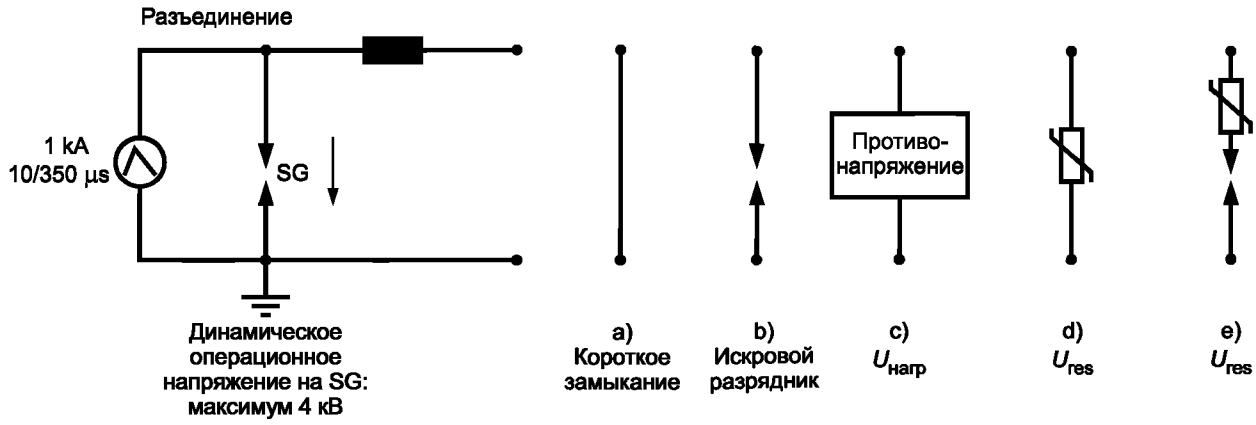


Рисунок Е.12 — Напряжение U_{SG} на разряднике для различных нагрузок

Разрядник отводящего тока УЗИП обычно состоит из одного или нескольких МОВ. Остаточное напряжение такого УЗИП всегда выше чем максимальное значение номинального напряжения питания (например, в системе переменного тока с номинальным напряжением 240 В, максимальное напряжение на частоте питания равно $\sqrt{2}$ x 240В = 340 В, которое ниже напряжения установленного УЗИП). Это максимальное номинальное напряжение питания соответствует самому низкому допустимому напряжению УЗИП. Поэтому, это максимальное напряжение должно быть взято в качестве минимума допустимого противонапряжения. Если в случае c) использовать ток короткого замыкания, а не противонапряжение, то это привело бы к повышенным требованиям к разъединяющему элементу. В таблице Е.1 показаны значения индуктивности, при которых с гарантией происходит срабатывание разрядника SG для различных нагрузок, случаи от a) до e) на рисунке.

Таблица Е.1 — Индуктивность, гарантирующая разъединение

Случай	Разъединяющая индуктивность мкГн[a]	
	Компьютерное моделирование	Грубая оценка[b]
a) Короткое замыкание	30	40
b) Искровой разрядник Напряжение дуги = 30 В	30	40
c) Противонапряжение $\sqrt{2}*U_n$	24	37
d) МОВ U_{res}(1 мА) = 430 В	19	32
e) МОВ U_{res}(1 мА) = 180 В	22	36

[a] Для заданного импульса 1 кА, 10/350
[b] Эта грубая оценка при использовании $\Delta I/\Delta T$ (10 % к 90 %) вместо максимума d*i*/d*t*. См. обсуждение в Е.2.1 консервативных результатов, следующих из использования $\Delta I/\Delta T$.

Е.4 Координация между УЗИП, коммутирующими напряжение

Рисунок Е.13 иллюстрирует эту основную разновидность координации, обычно используемую в телекоммуникациях. Для координации разрядников необходимо использовать их динамические рабочие характеристики.

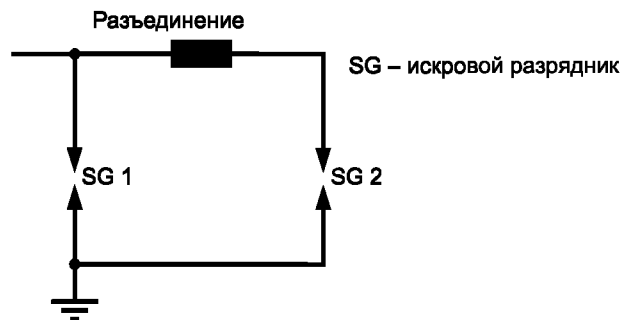


Рисунок Е.13 — Координация двух УЗИП (тип коммутирующий напряжение)

Если координации была выполнена правильно, то сначала пробьет SG2 а затем SG1. После пробоя SG2, координация будет обеспечена посредством разъединяющего элемента. Чтобы определить необходимые параметры разъединяющегося элемента, SG 2 может быть заменен на короткое замыкание. Для срабатывания SG1 необходимо, чтобы динамическое падение напряжения на разъединяющем элементе было выше, чем напряжение пробоя SG1. Если индуктивность используется в качестве элемента разъединения, необходимо рассмотреть форму волны (особенно значение d*i*/d*t*).

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.

После пробоя SG1 полная энергия будет разделена согласно характеристикам ток/напряжение отдельных элементов.

Примечание — следует также рассмотреть случай наличия источника возмущений на стороне нагрузки.

Е.5 Аналитические исследования, практические случаи

Е.5.1 Простой случай координации двух варисторов ZnO

Следующие соображения применяются только к ограничивающему УЗИП с одним портом, испытанному по классу I и II, когда зависимости U_{res} (I) известны для каждого устройства. Эти зависимости определяются, для формы волны 8/20 мкс и даются изготовителем в технической документации на УЗИП. Класс III и УЗИП с двумя портами нуждаются в особом рассмотрении.

Этот пример также направлен на лучшее понимание проблемы координации. Сначала случай двух УЗИП с варисторами ZnO, где возможно аналитическое исследование. Отметьте, что такое аналитическое исследование базируется только на совместном использовании. Обеспечение того, что удовлетворяются энергетические критерии, требуют дополнительных вычислений, которые обычно являются комплексными.

Если два варистора имеют одинаковый (и, следовательно, тот же самый номинальный ток разряда I и ту же самую энергетическую защищенность: тот же самый I_{max} и тот же самый I_{imp}), но имеют различные защитные уровни U_{p1} и U_{p2} (определенные для того же самого номинального тока разряда), то применяются следующие уравнения:

$$\begin{aligned} I_{n1} &= I_{n2} \\ I_{max1} &= I_{max2} \\ I_{imp1} &= I_{imp2}. \end{aligned} \qquad \text{(Е.3)}$$

Зависимость U_{res} (I) приведена на рисунке Е.14.

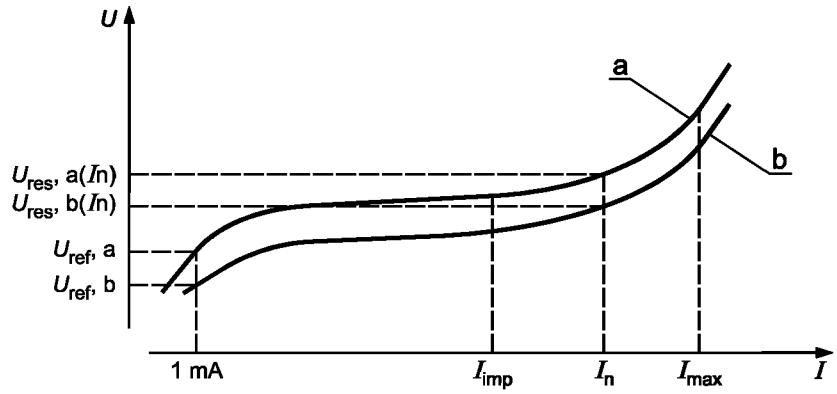


Рисунок Е.14 — Два варистора ZnO с одинаковым номинальным разрядным током

Следует рассмотреть два случая, касающихся относительных значений уровней защиты этих двух УЗИП.

Если $U_{p1} > U_{p2}$. В этом случае, кривая a) соответствует УЗИП1, а кривая b) УЗИП2. Эта координация будет вообще приемлемой при короткой волне, если длина кабеля превышает несколько метров (обычно 5 м или 10 м). С увеличением длины волны уменьшается разъединяющийся эффект; поэтому УЗИП2, возможно, придется противостоять полному воздействующему импульсному перенапряжению, которое возможно при этом сценарии, если УЗИП2 способен противостоять полному напряжению.

Если $U_{p1} < U_{p2}$, то в этом случае, кривая a) соответствует УЗИП2, а кривая b) УЗИП1. В большинстве случаев ток, протекающий через второй УЗИП меньше, чем воздействующий ток.

Энергетический критерий удовлетворяется в обоих случаях так как у обоих УЗИП, находящихся под напряжением, та же самая энергетическая защищенность. Этот первый случай был рассмотрен только для того, чтобы понять механизм, а не как предложение в использовании двух УЗИП с одинаковой энергетической защищенностью.

Если у этих двух варисторов различный номинальный ток разряда:

Для этого случая практически всегда $I_{n1} > I_{n2}$ и $E_{max1} > E_{max2}$ и кроме того характеристики УЗИП1 и УЗИП2 имеют соотношение U_{res1} (I_{n1}) < U_{res2} (I_{n1}).

Зависимости U_{res} (I) показаны на рисунке Е.15. Никакой импеданс не включается в характеристики, показанные на этом рисунке, поскольку это нелегко принять во внимание в упрощенном аналитическом

исследовании, если сложная численная модель не может быть применена с надежными данными для всех параметров цепи.

В этом случае можно заметить по рисунку Е.15, что с короткими волнами координация будет достигнута, поскольку большая часть тока (передний фронт) будет течь через первое УЗИП. Но при длинных волнах координация труднодостижима. Координация не может быть достигнута при длинных волнах и величине входящего тока ниже, чем ток в точке пересечения (см. рисунок Е.15) двух кривых. Большая часть входящих электрических токов через УЗИП2 — кривая U_{res2} становятся ниже чем U_{resi} при этом значении тока. Становится необходимым включение индуктивности между двумя УЗИП.

Следовательно необходимо сравнить кривые U_{res} (i) для тока I в пределах от 0,1 I_{n2} до I_{max1}, чтобы проверить, пересекают ли они друг друга, чтобы затем сравнить U_{res1} (I_{n1}) и U_{res2} (I_{n2}), которые даются в технической документации изготовителя. Величина тока в этой точке пересечения I_{cr} (или в другой) должна быть настолько низкой насколько возможно.

В этом случае у энергетического критерия есть высокая вероятность того, чтобы быть удовлетворенным. Чем ниже значение I_{cr}, тем выше вероятность успеха. Если есть сомнения, то необходимо вычисление энергии проходящей через второй УЗИП, с учетом импеданса между УЗИП и длины волны. Такое вычисление требует компьютерной программы, способной к моделированию нелинейного поведения УЗИП.

Если невозможно получить эти кривые из-за нехватки информации или если необходим простой и быстрый результат, тогда необходимо сравнить кривые U_{res1} и U_{res2} при том же самом значении I_{n2} (эта информация дается в спецификациях изготовителя). В таком случае условием для легкой и эффективной координации будет — U_{res1} (I_{n2}) < U_{res2} (I_{n2}), как показано в рисунке Е.15, где самая низкая линия представляет консервативную кривую для i.

В этом случае, даже если ток во втором УЗИП низок, энергетический критерий не может быть удовлетворен для импульсных перенапряжений с большой длительностью. Дополнительное вычисление энергии, проходящей через второе УЗИП, может оказаться необходимым.

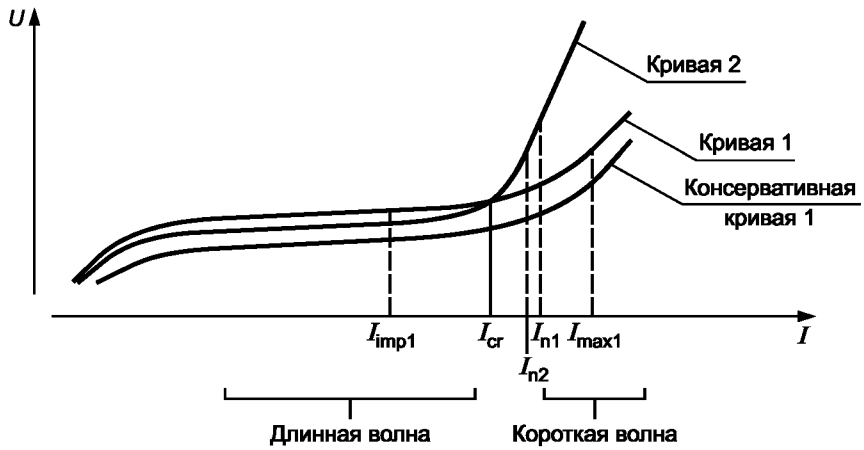


Рисунок Е.15 — Два варистора ZnO с различными номинальными разрядными токами

Е.5.2 Общее заключение относительно варисторов ZnO

В каждом случае, где два варистора ZnO должны быть скоординированы, должна использоваться следующая процедура с пятью шагами:

a) определить перенапряжения, которые, как ожидается, произойдут в отсутствие УЗИП и сделать различие между длинными волнами и короткими волнами;

b) УЗИП 2 должен тогда быть выбран согласно его требуемым защитным характеристикам;

c) сравните кривые U_{res} (I) с I в пределах от 0,1 х I_{n2} до I_{max1}. Затем определите точку пересечения I_{cr}. Если этот текущий I_{cr} достаточно низок (обычно 0,1 х I_{n2}), то тогда нет необходимости вычислять энергию во втором SPD. Энергетический критерий будет выполняться, независимо от расстояния между УЗИП.

Если есть сомнение, вычислите энергию, рассеиваемую во втором УЗИП, с учетом импеданса между УЗИП и проверьте энергетический критерий.

Если такие кривые не доступны, то выбирают УЗИП2 со следующими требованиями:

- если у УЗИП2 тот же самый, номинальный ток разряда: U_{res1} (I_n) < U_{res2} (I_n);
- если у УЗИП2 меньший, номинальный ток разряда: U_{res1} (I_{n2}) < U_{res2} (I_{n2}).

Тогда было бы целесообразно вычислить энергию в УЗИП2, чтобы проверить энергетический критерий.

e) повторять, пока шаг c) не даст удовлетворительный результат.

Примечание 1 — Значения напряжения при очень низком токе (обычно вызванное индуцированным напряжением) не применимы для определения координации.

Примечание 2 — В любом случае (с или без варисторов ZnO), соображения ЭМС требуют, чтобы ток, текущий через УЗИП2, был как можно меньше.

Примечание 3 — Кривые U_{res} (I) являются максимальными значениями. Необходимо учесть изменение характеристик из-за производственных допусков. Изготовитель может предоставить эти данные.

Примечание 4 — Предыдущие исследования могут быть обобщены больше чем для двух УЗИП.

Е.5.3 Аналитическое исследование: координации при применении ZnO разрядника

Другой общий случай — это использование искрового разрядника для УЗИП1 и варистора ZnO для УЗИП2 (см. рисунок Е.9).

В этом случае координация достигается, когда разряд происходит прежде, чем перенапряжение возникнет на УЗИП2. Перед этим разрядом мы имеем:

$$U_{|} = U_{rez2}(i) + L di/dt). \quad (E.4)$$

Как только U_1 превышает динамическое напряжение разряда на разряднике (U_{dyn}), координация достигнута, поскольку воздействие на второй УЗИП уменьшается. Это зависит только от характеристик ZnO варистора (УЗИП2), динамического напряжения разряда на разряднике (SPD1), скорости нарастания и величине входящего импульса i и разделительного расстояния между УЗИП (индуктивности L).

Пример вычисления необходимых значений для разъединяющей индуктивности между искровым разрядником и варистором (см. рисунок Е.9).

Исходные данные:

- импульс тока с передним фронтом 100 А/мкс (согласно МЭК 61312-1);
- искровой разряд при напряжении со значением между 3 и 3,5 кВ. Вычисления сделаны с запасом для 4 кВ;
- варистор выбран так, чтобы ограничить любое перенапряжение ниже 4 кВ.

Эти условия гарантируют, что не будет мертвой точки, вызванной недостаточным напряжением в разрыве, поскольку это напряжение обязано превышать 4 кВ во время нарастания импульса. При уровне в 4 кВ варистор, как предполагается, проводит 5 кА с соответствующим остаточным напряжением в 2 кВ. Поэтому индуктивность должна внести дополнительные 2 кВ, добавленные к остаточному напряжению варистора, чтобы получить необходимые 4 кВ в точках разрыва. Значение индуктивности может быть вычислено как:

$$L = U/(\mathrm{di/dt}) = 2\ \text{кВ}/(100\ \text{А/мкс}) = 20\ \text{мкГн}.$$

Для этого примера, гарантирующего разъединение, можно определить и необходимую энергетическую характеристику варистора. Значение di/dt было выбрано, исходя из самого низкого ожидаемого уровня. Приблизительно 99 % грозовых перенапряжений превысят это значение, и вызовут более высокие напряжения и на индуктивности и на разряднике. Требуемое значение индуктивности может быть определено за вычетом индуктивности кабеля, принимая последнюю равной 1 мкГн/м.

Е.5.4 Общее заключение относительно координации при применении МОВ

Если в качестве УЗИП1 выбран разрядник, необходимо выбрать УЗИП2 согласно следующему требованию для данного входящего импульса:

$$U_{dyn} < U_{res}(I_{peak}) + \mathrm{L} \times 0{,}1.$$

(Коэффицмент 0,1 соответствует принятому значению 100 А/мкс.)

$$U_{dyn} < U_{res}(I_{peak2}) + \mathrm{L} \times 0{,}1.$$

Е.6 Виды координации систем защиты

Е.6.1 Основные виды координации систем защиты

Четыре вида координации можно рассмотреть для систем защиты. Первые три основаны на современных технологиях для УЗИП с одним портом. Вариант IV для УЗИП с двумя портами с встроенными элементами разъединения. При использовании этих разновидностей координации также необходимо принять во внимание те УЗИП, которые могут быть встроены в оборудование в целях защиты.

Вид I (все типы ограничивающие напряжение — одинаковые остаточные напряжения)

Для этого вида у всех УЗИП есть непрерывная монотонная характеристика ток/напряжение, такая как у варисторов или у диодов, и они выбираются с одинаковым остаточным напряжением U_{res}.

Координация УЗИП с защищаемым оборудованием, обычно достигается за счет собственных импедансов соединительных линий (см. рисунок Е.16).

Примечание. Допуски на компоненты УЗИП могут иметь большое влияние на результат.

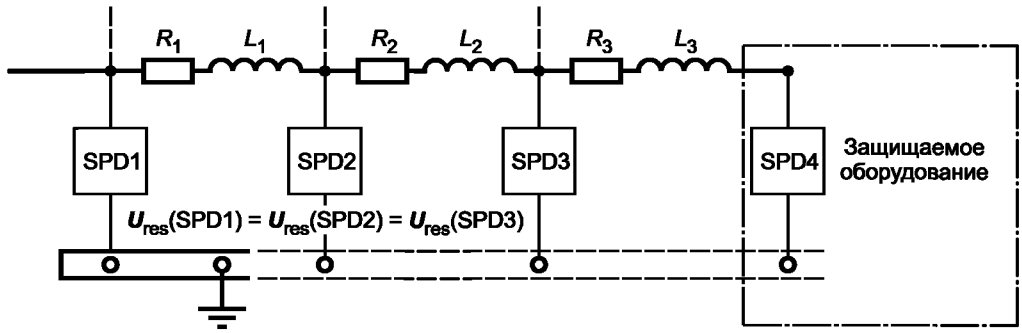


Рисунок Е.16 — Принцип координации для вида I

Вид II (все типы ограничивающие напряжение — увеличивающиеся остаточные напряжения)

Для этого вида у всех УЗИП есть непрерывная монотонная характеристика ток/напряжение, такая как у варисторов или у диодов, и они выбираются с остаточным напряжением U_{res}, увеличивающимся шагами от первого к каждому последующему УЗИП.

Этот вид координации для систем электроснабжения. Проблема для этого вида — это фильтры и УЗИП, встроенные в оборудование изготовителем оборудования, которые должны быть включены в понятие координации (см. рисунок Е.17). Эта ситуация очень трудная, потому что данные этих внутренних УЗИП обычно неизвестны, и часто, выбранные изготовителем оборудования УЗИП, имеют намерено выбранное низкое остаточное напряжение U_{res}.

Примечание — Необходимо чтобы уровень защиты по напряжению последнего УЗИП (УЗИП3 на рисунке Е.17) был ниже, чем уровень защищенности оборудования, которое будет защищено. Эта разновидность требует того, чтобы остаточное напряжение защитного компонента, который устанавливается в защищаемом оборудовании, был выше чем остаточное напряжение того УЗИП, которое устанавливается непосредственно перед ним.

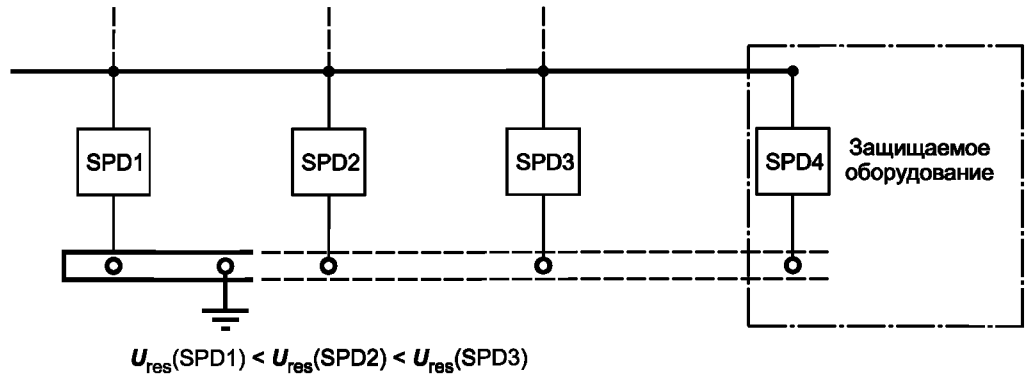


Рисунок Е.17 — Принцип координации для вида II

Вид III (гибридная комбинация)

Для этого вида первое (вводное) УЗИП (УЗИП1, рисунок Е.18) включает компонент, имеющий прерывистую характеристику ток/напряжение (коммутирующий тип УЗИП, например, с искровым разрядником). У выходного УЗИП есть компоненты с непрерывными характеристиками ток/напряжение (УЗИП ограничивающего типа).

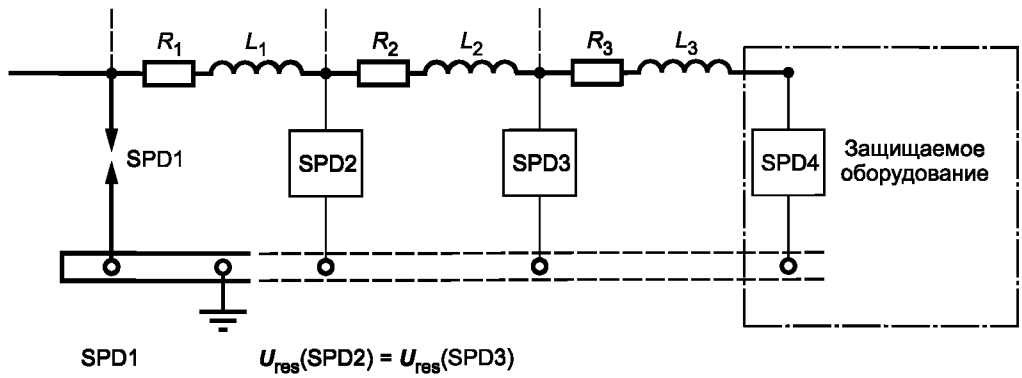


Рисунок Е.18 — Принцип координации для вида III

Характерной особенностью этого вида является то, что, вследствие коммутирующего поведения первого УЗИП, сокращает время достижения половинного тока воздействующих импульсов, такие как 10/350 мкс, что значительно облегчает условия для выходного УЗИП.

Вид IV (встроенный разъединяющий элемент)

Возможно создать УЗИП с двумя портами, которые включают каскадно-включенные УЗИП, скоординированные путем подбора импедансов или фильтров. Удачный подбор внутренних средств координации обеспечивает минимальную передачу энергии к выходному УЗИП или оборудованию. Эти УЗИП должны быть полностью скоординированными с другими УЗИП в системе в соответствии с их видом I, II или III (см. рисунок Е.19).

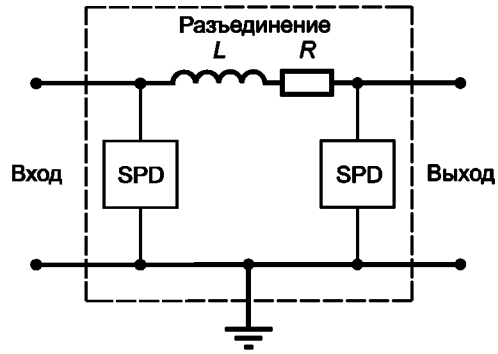


Рисунок Е.19 — Принцип координации для вида IV

Е.6.2 Энергетический метод координации

Этот метод координации, со стандартными импульсными параметрами, является процедурой по выбору и координации УЗИП. Основное преимущество этого метода — возможность рассмотреть УЗИП как черный ящик (см. рисунок Е.20). 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 выходных зажимах. Это позволяет сделать энергетический принцип. Эти выходные 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.

Примечание. Это обеспечивает удовлетворительные результаты, когда характеристики УЗИП1 настолько отличаются от УЗИП 2, что условия импульсного пернапряжения на УЗИП 2 являются квазизависимыми от текущего состояния. Например, это условие выполняется в случае координации между искровым разрядником и МОВ.

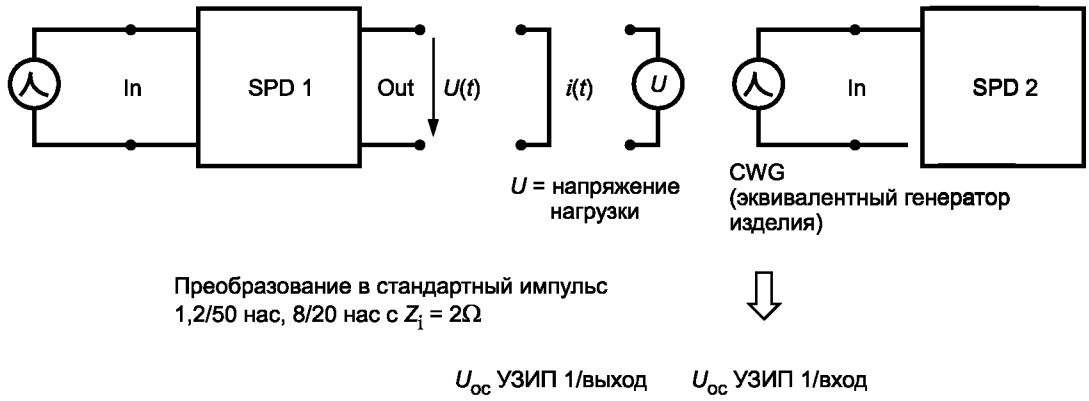


Рисунок Е.20 — Энергетический метод со стандартными параметрами импульсов

Цель этого метода координации состоит в том, чтобы сделать входные значения УЗИП 2 (например, разрядный ток) совместимым с выходными значениями УЗИП1 (например, уровнем защиты по напряжению). Для ступенчатой защиты эквивалентный входной импульс комбинированной волны, который может быть поглощен следующим УЗИП (без повреждения), должен быть равным или больше, чем эквивалентный выходной импульс комбинированной волны предыдущего УЗИП.

Для надежной координации эквивалентный импульс комбинированной волны должен быть определен для самого тяжелого случая воздействия (i_{max}, u_{max}, допустимая энергия). Для рассмотрения этого метода здесь берется консервативное значение для разъединяющего элемента (импеданс) между двумя УЗИП. Это означает, что если такой импеданс устанавливается между двумя УЗИП, то координация будет действовать вообще лучше, чем определенная путем вычислений.

По этому методу выход каждого УЗИП представляется, как эквивалентный генератор комбинированной волны (CWG), с напряжением разомкнутой цепи U_{oc} 1,2/50 мкс, текущий значением тока короткого замыкания I_{sc} 8/20 мкс и эффективным импедансом генератора 2 Ом.

УЗИП, испытанный по классу III, уже испытан от такого генератора комбинированной волны. В случае УЗИП, испытанного по классу II, необходимо убедиться, что $I_{sc} = I_{max}$.

УЗИП на вводе должен соответствовать классу I в случае прямого удара молнии в здание или классу II.

Напряжение на выходе каждого УЗИП будет определяться разрядом и не является непосредственно связанным с 1,2/50 мкс и 8/20 мкс волнами. В этом случае необходимо нормализовать фактический разряд, чтобы преобразовать их в 1,2/50 мкс и 8/20 мкс волны.

Это делается путем вычисления следующих значений:

- амплитудное значение $u = u$, $f\,u\,dt$ и $\sqrt{fu^2}\,dt$;
- амплитудное значение $i = i$, $f\,i\,dt$ и $\sqrt{fi^2}\,dt$;

Эти значения вводятся в таблицу Е.2.

Таблица Е.2 — Нормализованные значения

Напряжение	u	$f\,u\,dt$	$\sqrt{fu^2}\,dt$
Ток	i	$f\,i\,dt$	$\sqrt{fi^2}\,dt$

Та же самая таблица для генератора комбинированной волны с амплитудой 1 В становится таблицей ссылок Е.3.

Таблица Е.3 — Ссылочная таблица

Напряжение	1	70×10^{-6}	6×10^{-3}
Ток	5	12×10^{-6}	2×10^{-3}

Деля каждую ячейку таблицы Е.2 на соответствующую ячейку таблицы ссылок Е.3, получим таблицу Е.4.

Таблица Е.4 — Эквивалентные значения

Напряжение	*ы*	$fu\,dt/(70 \times 10^{-6})$	$V fu^2\,dt/(6 \times 10^{-3})$
Ток	*о*	$fi\,dt/(12 \times 10^{-6})$	$V fi^2\,dt/(2 \times 10^{-3})$

Максимальное значение в таблице Е.4 дает значение U_{oc}, эквивалентного генератора CWG. Это значение соответствует выходу УЗИП.

Если выход УЗИП был испытан согласно классу III с CWG без нагрузки $U_{oc\ тест}$ (эквивалентный генератор CWG в случае испытаний по II классу) то можно сразу определить, достигается ли координация или нет. Для этого достаточно проверять, что $U_{oc\ tect} > U_{oc\ equivalent}$.

Значения на выходе УЗИП для данного напряжения на входе должны быть вычислены на основании программ моделирования. Они не должны вычисляться для каждого случая использования, потому что они могут быть вычислены заранее изготовителем. Для каждого изделия изготовитель может рассчитать выход эквивалентного генератора CWG для данного напряжения (I_{imp} для испытаний по классу I, I_{max} для испытаний по классу II, или $U_{oc,\ макс}$ CWG для испытаний по классу III), с учетом обоих допусков на характеристики УЗИП и любой мертвой точки (самое тяжелое воздействие на выходе УЗИП, определенное не максимальными значениями: I_{imp}, I_{max} и $U_{oc\ max}$, а для нижних значений).

Е.7 Демонстрационные испытания по координации

Цель испытаний, определенных здесь, состоит в том, чтобы демонстрировать эффективность метода энергетической координации многоступенчатых последовательно соединенных УЗИП. Из-за различного электричес-

кого поведения отдельных типов УЗИП (ограничивающий тип и коммутирующий тип) общая стратегия испытаний невозможна. Поэтому следующие протоколы испытаний получены для других последовательно включенных УЗИП с заданным током на вводе первого УЗИП.

Примечание — Поверка координация УЗИП, испытанных по классу I, с другими классами УЗИП (такими как класса II или класса III), должна основываться на пробое импульсным током 10/350 мкс. Поверка координация УЗИП, испытанных по II классу, с другими классами УЗИП, должна основываться на пробое импульсным током 8/20 мкс. Объекты с количеством УЗИП большим двух могут быть уменьшены до этой базовой модели.

Е.7.1 Координация УЗИП с последовательно включенными элементами типа, ограничивающего напряжение

Импульсный ток вводится в первое (входное) УЗИП относительно направления распространения импульса на вводе последовательной цепочки УЗИП законченного изделия. Начиная с 0 кА амплитуда импульсного тока повышается ступенями по 25 % от самого высокого указанного значения тока I_{peak} или значение I_{max} УЗИП.

Испытания рассматривают как успешные, если отдельные элементы УЗИП будут соответствовать заданным критериям (отсутствие существенных изменений) для испытаний, которые будут проведены после демонстрационных испытаний на координацию.

Е.7.2 Координация УЗИП с последовательно включенными элементами коммутационного типа

Координации для УЗИП с последовательно включенными элементами выполняется посредством воздействия импульсного напряжения с формой волны 1,2/50 мкс. Условия энергетической координации рассматривают как удовлетворительные, если в соответствующем диапазоне крутизны входного напряжения (разряд напряжения постоянного тока с крутизной до нескольких киловольт в микросекунду) для отдельных УЗИП будет обеспечена высокая пропускная способность, обеспечивающая поглощение в начальной части, до выходного УЗИП, имеющим низкую пропускную способность. Если это не достигается, то должен быть применен испытательный протокол Е.7.3, приведенный ниже.

Испытания рассматривают как успешные, если отдельные элементы УЗИП будут соответствовать заданным критериям (отсутствие существенных изменений) для испытаний, которые будут проведены после демонстрационных испытаний на координацию.

Примечание — В этом описании термин "поглощение" должен быть понят как общее обозначение характеристики коммутирующего УЗИП, касающейся изменения от высокого до низкого состояния (искровой разряд самопоглощается в твердотельном УЗИП).

Е.7.3 Координация УЗИП с последовательно включенными элементами типа, ограничивающего напряжение с УЗИП коммутирующего типа

Определенная проблема для этого сочетания состоит в том, что коммутирующий напряжение тип УЗИП может иметь мертвую точку, в результате чего к выходному (оконечному) УЗИП будет приложен полный импульсный ток. Этот худший случай для координации может быть продемонстрирован при следующем испытании. Импульсный ток с соответствующей формой волны вводится в последовательную цепь, смонтированную согласно инструкции изготовителя, ступенчато. УЗИП на вводе поглощает и пропускает ток. Амплитуда импульсного тока, заданная таким образом, затем уменьшается ступенями по 5 % до тех пор, пока во вводном УЗИП не прекращается поглощение. Вся процедура выполняется трижды. Среднее значение импульсного тока по трем измерениям (которые не приводят к срабатыванию входного УЗИП) определяется, как значение мертвой точки (I_{BS}). Для последовательной комбинации применяют три значения I_{BS} — 75 %, 100 % и 125 %.

Испытания рассматривают как успешные, если отдельные элементы УЗИП будут соответствовать заданным критериям (отсутствие существенных изменений) для испытаний, которые будут проведены после демонстрационных испытаний на координацию.

Е.7.4 Требования для испытаний и методов моделирования

Методы, используемые в демонстрационных тестах и при числовом моделировании, могут влиять на результаты до такой степени, что их сравнение может стать затруднительным, если не было уделено соответствующее внимание при определении параметров, в особенности форме тока использованной в испытаниях или заданной при моделировании. Эта предосторожность особенно важна относительно скорости нарастания импульсного тока. В последовательной цепи, где на вводе установлено УЗИП коммутационного типа, а на выходе УЗИП типа ограничивающего напряжение, задача состоит в том, чтобы срабатывание УЗИП на вводе происходило в начальной фазе нарастания импульса за время существенно меньше, чем одна микросекунда. В этом случае, обычное определение времени переднего фронта (1,25 x [время от 10 % до 90 %]), недостаточно, чтобы охарактеризовать максимальный уровень текущего значения производной, который определит напряжение на разъединяющей индуктивности последовательной цепи.

Чтобы получить сопоставимые и разумные результаты, крутизна передней стороны волны должна быть четко определена. Фактор крутизны предлагается, как показано на рисунке Е.21, чтобы обеспечить эмпирический критерий для соответствия формы испытательной волны.

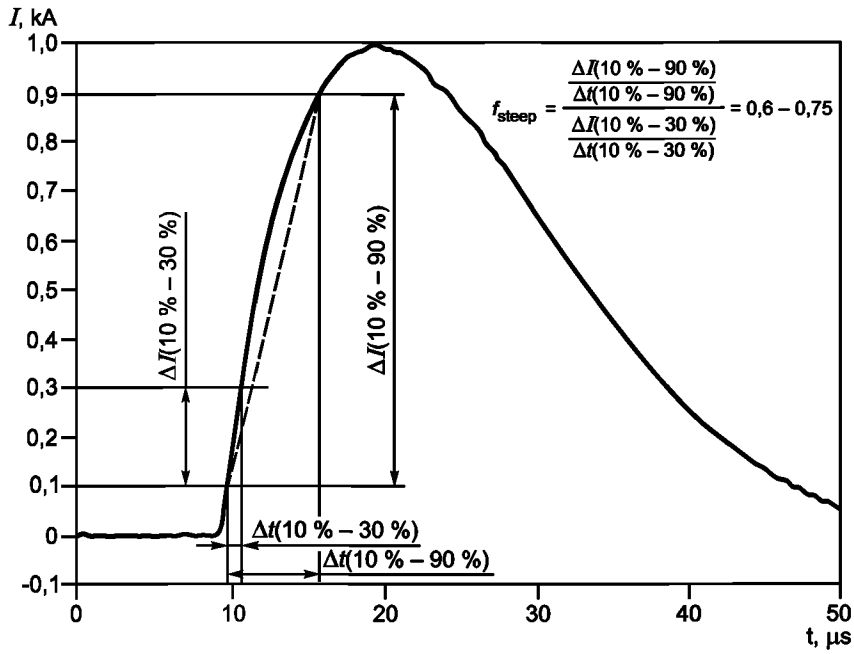


Рисунок Е.21 — Фактор крутизны для формы импульсного тока

Для моделирования форма волны не должна иметь резкого возрастания в нуле времени, а начинаться с пологого участка. Фактор крутизны, для импульсного тока, описанные как удвоенная экспонента или ослабленный синус, определяется как отношение величины производной (d*i*/d*t*), вычисленный для интервала (10 % к 90 %), к величине производной, вычисленной для интервала (10 % — 30 %). Как правило, более высокое значение величины производной находится около источника (должен быть упомянутый пологий участок), то есть, в интервале (10 % — 30 %). Таким образом, "передний фронт" характеризуемый фактором крутизны, меньшим, чем единица. Для примера на рисунке Е.21, этот фактор находится в пределах 0,7. Следующий критерий 0,1 кА/мкс значения производной для импульсного тока определяется по МЭК 61312-3.

Е.8 Примеры координации

Пример 1. Координация между двумя УЗИП, испытанных по классу II.

Для характеристики УЗИП, испытанных по классу II используются следующие параметры.

- U_p уровень защитного напряжения, выбранного из ряда предпочтительных значений;
- I_n импульс тока 8/20, используемый для классификации УЗИП согласно класса II;
- I_{max} максимальный ток для испытаний по классу II.

Необходимо скоординировать УЗИП, который устанавливается непосредственно на вводе защищаемого оборудования относительно его характеристик. Эта координация требует, чтобы характеристики защищенности оборудования не были превышены для любого соответствующего параметра.

Определение параметров защищенности вводов оборудования следует проводить в соответствии с требованиями и рекомендациями стандартов МЭК 61000-4-5, МЭК 60664-1, ITU-TS K.20, и ITU-TS K.21.

Примечание — Оборудование, соответствующее требованиям вышеупомянутых стандартов, может включать встроенные УЗИП, поэтому параметры этих устройств могут повлиять или изменить рассмотренные принципы координации.

Таблица Е.5 — Пример координации между двумя УЗИП класса II

Первое УЗИП, испытанное по II классу			**Второе УЗИП, испытанное по II классу**			**Минимальное расстояние между УЗИП** м[a]
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 1,5 1,2 1,0	10 15 20 25

Окончание таблицы Е.5

Первое УЗИП, испытанное по II классу			Второе УЗИП, испытанное по II классу			Минимальное расстояние между УЗИП м[a]
U_p кВ	I_n кА	I_{max} кА	U_p кВ	I_n кА	I_{max} кА	
2,5	20	10	4	2	1,8 1,2 1,0	10 15 20
	10	5	4	2	1,5	10
2,0	40	20	10	5	1,8 1,5 1,2 1,0	5 10 10 15
	20	10	4	2	1,8 1,2 1,0	5 10 10
1,8	40	20	10	5	1,2 1,0	5 10
	20	10	10	5	1,5	5
			4	2	1,2 1,0	10 10
Эквивалентное расстояние дается на основе 1 jH/m расстояния между двумя УЗИП. Поэтому, 10 м средства 10 jH и наоборот. Это расстояние включает поля.						

Пример 2. Координация между УЗИП, испытанным согласно классу I и УЗИП, испытанным согласно классу II с искровым разрядником или варистором.

В этом случае, самый тяжелый случай рассчитывается для УЗИП при коротком замыкании. Результаты вычисления приведены в таблице Е.6.

Таблица Е.6 — Пример координации между УЗИП Класса I и УЗИП Класса II

Первое УЗИП, испытанное по Классу II	Второе УЗИП, испытанное по Классу II	Минимальное расстояние между УЗИП м[a]
Напряжение разрядника 4 кВ	Короткое замыкание	40
	Искровой разрядник	40
	Варистор (U_{ref} в 1 мА = 430 В)	32
	Варистор (U_{ref} в 1 мА = 180 В)	36
[a] Эквивалентное расстояние дается при 1мкГн/м расстояния между двумя УЗИП. Поэтому, 10 м соответствуют 10 мкГнjН и наоборот. Это расстояние включает поля.		

Таблица Е.7 — Параметры для испытаний по Классу I (МЭК 61643-1)

I_{peak}	Q (С) в пределах 10 мс
20	10
10	5
5	25
2	1
1	5
Примечание. В случае значений, отличающихся от данных в этой таблице, отношение между I_{peak} и Q задается формулой Q (А.с) = 0,5 Ipeak (кА).	

Приложение F
(справочное)

Снижение перенапряжений за счет качественного заземления и оптимальной прокладки кабелей

Перенапряжений можно избежать многими способами, реализуемыми на обеспечение ЭМС: надлежащие кабельные соединения, надлежащий выбор кабелей с низким импедансом, надлежащий выбор кабельных трасс (маршрутизация кабелей) и положительным воздействием системы заземления. В настоящем приложении F.1 приведены практические примеры реализации этих принципов для заземления и кабельных соединений.

F.1Общие принципы

Во-первых, четкое различие должно быть сделано между цепями для рассматриваемого сигнала или питания с одной стороны, и цепями по которым протекают токи возмущений. Связь между этими цепями определяется импедансом передачи Z_t., который должен быть выбран таким образом, чтобы снизить до приемлемого уровня передаваемые возмущения.

Второе важное понятие это параллельный проводник заземления (PEC). Этот проводник обеспечивает путь для токов возмущения. В качестве него может быть использован кабельный экран или даже броня кабеля, которая не предназначена для использования в качестве экрана, но все же обеспечивает хорошую защиту, если ее присоединить должным образом.

Третье понятие касается корпуса ЭМС для защиты электронного оборудования от всевозможных электромагнитных возмущений. Пример такого обеспечения приведен ниже.

F.2 Корпус ЭМС

На рисунке F.1 приведен принцип корпусного обеспечения ЭМС. Основное действие этого корпуса ЭМС обеспечить путь для возмущений или токов общего режима, достигающих оборудования через кабели. У этого пути должен быть низкий импеданс передачи Z_t относительно оборудования. С этой целью, все кабельные экраны тщательно и полностью соединяются с задней панелью. Питание подается через фильтр F также смонтированный в этой панели; фильтр должен обеспечить путь для тока общего режима к задней панели. Сетевой фильтр, который используется в корпусе, может также содержать защитные устройства от импульсных перенапряжений. Другие неэкранированные кабели должны также входить через соответствующие и правильно смонтированные фильтры. Переднюю сторону корпуса ЭМС можно оставить открытой. Никакие кабели или другие проводники не должны входить в корпус через переднюю открытую сторону.

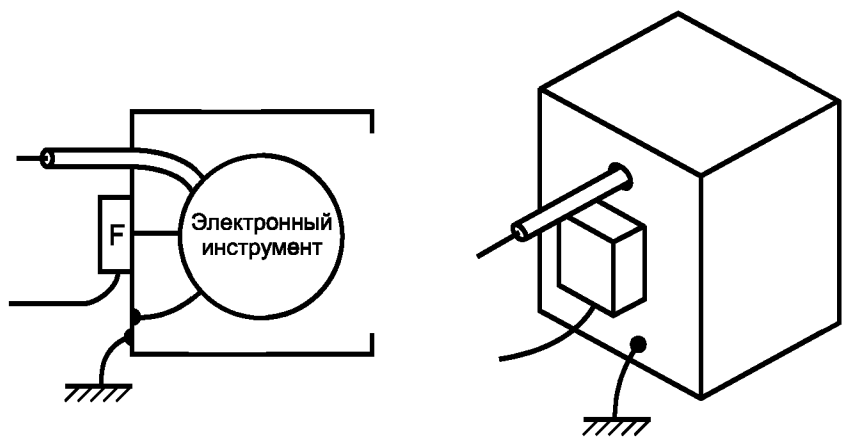


Рисунок F.1 — Обеспечение электромагнитной совместимости электронного оборудования с токами в кабелях обычного вида

F.3 Обеспечение защиты соответствующими кабельными соединениями

В качестве примера применения соответствующих методов выполнения кабельных соединений на снижение взаимодействий ниже описывается эксперимент, который был выполнен на стороне высокого напряжения (ВН) подстанции. Приведенные результаты являются обобщающими и могут также быть применены ко многим другим установкам, где могут произойти взаимодействия между системами: телекоммуникации, радиостанции, компьютеры и т.д.

Автоматический выключатель (СВ на рисунке F.2) соединяет преобразователь ВН со сборными шинами на 150 кВ. Первый пробой на стороне ВН вызывает крутой передний фронт. Многократные отражения в системе ВН искажают этот передний фронт, превращая его в интенсивную высокочастотную волну воздействия (приблизительно 400 кГц, 250 А). Контур для высокочастотного (HF) источника тока включает — вывод ВН, паразитную емкость трансформатора относительно его металлических частей; и путь возврата тока к системе ВН через землю.

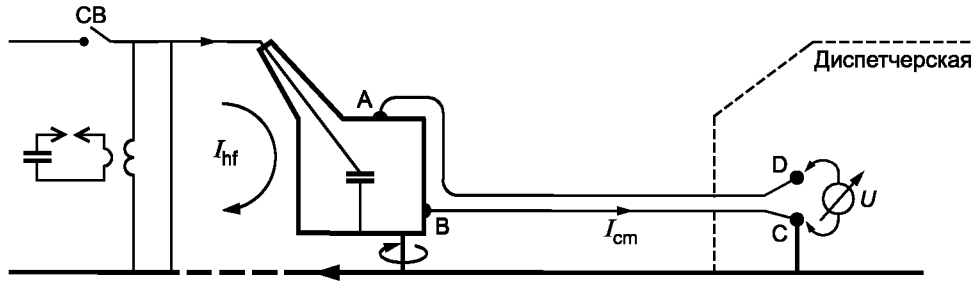


Рисунок F.2 — Влияние коммутационных перенапряжений обычного вида

Первоначально температурный датчик был смонтирован наверху трансформатора рисунок F.2. Температурный сигнал к диспетчерской передается по двухпроводной линии. Действие СВ привело к возникновению напряжения общего режима в несколько киловольт между проводами (в точке D на рисунке F.2) и соседней землей в диспетчерской. Это перенапряжение вызвало настоящие проблемы в конкретной установке.

Замыкание автоматического выключателя СВ вызывает кольцевую волну с крутым передним фронтом в системе ВН. Эта волна может также быть сгенерирована конденсаторным разрядом. Во вторичном контуре A-B-C-D из-за протекания тока I_{hf}, возникает большое напряжение U между точками D и C в диспетчерской. Дополнительные проводники, заземленные в точке A или B на трансформаторе и в точке C в диспетчерской, существенно уменьшают напряжение возмущения.

В эксперименте эти два провода для температурного датчика были заменены кабелем, проложенным по той же самой трассе. Кабель был накоротко присоединен вверху трансформатора рисунок F.2. Основной возмущающий ток был сгенерирован конденсаторным разрядом HF источника на выходе ВН; этот источник производит подобные возмущения и без повторного включения СВ. На этой установке было измерено возмущающее напряжение 2,3 кВ в диспетчерской между точками D и C на рисунке F.2, из-за взаимной индукции между основным устройством цепи и цепью A-D-земля в C-земля около точки B.

Единственный вывод в кабеле был тогда соединен между точкой A и C (заземленный и в точке A и в точке C); это привело к четырехкратному сокращению возмущающего напряжения (см. рисунок F.3). Грубо намотанная стальная броня кабеля использовалась в качестве экрана, и была заземлена в точках A и C рис. F.2. Это понизило возмущающее напряжение еще больше.

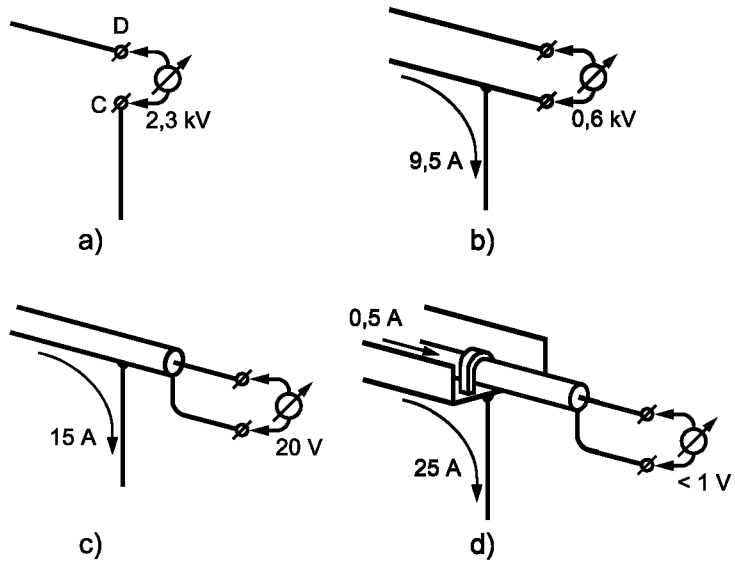


Рисунок F.3 — Измерение напряжения в диспетчерской на кабеле, закороченном на первичной стороне трансформатора. Токи обычного вида для различных параллельных заземляющих проводников между точками A и C.

Наконец этот кабель (броня, все еще соединенная в точке A), был проложен в стальном кабелепроводе, заземленном в точках B и C. Полученное возмущение напряжения в конфигурации (d) было уменьшено до 1В, от начальных 2,3 кВ, полученных для конфигурации (a).

Этот эксперимент дает единственное решение, — это применение брони, и применение брони усиленное действием кабелепровода в качестве параллельного проводника заземления (PEC). В приведенном случае импеданс заземленного контура уменьшается, что показывает увеличение тока через PEC (рисунок F.3). Импеданс передачи PEC-проводника уменьшается намного быстрее и до такой степени, что самое низкое напряжение, измеренное в этих четырех случаях, произошло в последнем случае (d) при включении самого большого тока.

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов ссылочным национальным стандартам Российской Федерации и действующему в этом качестве межгосударственному стандарту

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочных международных стандартов	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующих национальных стандартов
МЭК 60364-4-44:2007	MOD	ГОСТ Р 50571-4-44—2011 (МЭК 60364-4-44:2007) «Электроустановки низковольтные. Часть 4-44. Требования по обеспечению безопасности. Защита от отклонений напряжения и электромагнитных помех»
МЭК 60664-1:2012	IDT	ГОСТ Р МЭК 60664.1—2012 «Координация изоляции для оборудования в низковольтных системах. Часть 1. Принципы, требования и испытания»
МЭК 61000-2-5:1995	MOD	ГОСТ Р 51317.2.5—2000 (МЭК 61000-2-5—95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств»
МЭК 61000-4-1:2006	MOD	ГОСТ Р 51317.4.1—2000 (МЭК 61000-4-1—2000) «Совместимость технических средств электромагнитная. Испытания на помехоустойчивость. Виды испытаний»
МЭК 61000-4-4:2004	MOD	ГОСТ Р 51317.4.4—2007 (МЭК 61000-4-4:2004) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний»
МЭК 61000-4-5:2005	—	*
МЭК 62305-1:2010	IDT	ГОСТ Р МЭК 62305-1—2010 «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы»
МЭК 62305-2:2010	IDT	ГОСТ Р МЭК 62305-2—2010 «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 2. Оценка риска»
МЭК 62305-3:2010	—	*
МЭК 62305-4:2010	—	*
МЭК 61643-1:2005	MOD	ГОСТ Р 51992—2010 (МЭК 61643-1:2005) «Низковольтные устройства для защиты от импульсных перенапряжений. Часть 1. Устройства для защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. Требования и испытания»
МЭК 61643-12:2002	IDT	ГОСТ Р МЭК 61643-12—2011 (МЭК 61643-12:2002) «Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 12. Устройства защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. Принципы выбора и применения»

* Соответствующий стандарт отсутствует.

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:

- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированные стандарты

Библиография

[1] Anderson, R.B. and Eriksson A.J., «Lightning parameters for engineering applications», ELECTRA No. 69, March 1980.

[2] CIGRE Study Committee No. 33, WG 33.01 «Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines», Electra Brochure, 1992.

[3] Johannesen, S.T., Huse, J., and Johansen, H., «Statistical analyses of fire damages in relation to lightning», Proceedings, 22nd International Conference on Lightning Protection, Budapest, 1994.

[4] Nucci, C. A., «Lightning-induced voltages on overhead power lines» CIGRE WG 33-01- ELECTRA No.162, October 1995.
Pelletin, J. and Leroy, J. «Expérimentation réseaux témoins — Résultats de la campagne d'investigations 1973. Enregistrement de surtensions atmosphériques affectant les postes MT/BT et les dérivations d'abonnés d'artéres de distribution rurales — Analyse statistique des enregistrements» [Experiments on sample networks — Results from the 1973 investigation. Recordings of atmospheric overvoltages on MV/LV stations and rural distribution lines — Statistical analysis of the recordings] — EDF — DER — M15—375 — May 1974.

УДК 621.316.542:006.354 ОКС 29.020 91.140.50 Е71 ОКП 34 6400

Ключевые слова: удар молнии, грозовые перенапряжения, коммутационные перенапряжения, временные перенапряжения, устройство защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП), низковольтные электроустановки, электроустановки среднего напряжения, заземления

Редактор *Т. С. Никифорова*
Технический редактор *В. Н. Прусакова*
Корректор *С. И. Фирсова*
Компьютерная верстка *Т. Ф. Кузнецовой*

Сдано в набор 20.08.2014. Подписано в печать 04.12.2014. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Ариал. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,09. Уч.-изд. л. 11,40. Тираж 48 экз. Зак. 1351.

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru
Набрано и отпечатано в Калужской типографии стандартов, 248021 Калуга, ул. Московская, 256.

gost.e-ecolog.ru