



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

**МСЭ-Т**

СЕКТОР СТАНДАРТИЗАЦИИ  
ЭЛЕКТРОСВЯЗИ МСЭ

**К.67**

(02/2006)

СЕРИЯ К: ЗАЩИТА ОТ ПОМЕХ

---

**Ожидаемые выбросы для сетей  
электросвязи и сигнализации под влиянием  
разряда молнии**

Рекомендация МСЭ-Т К.67

---



## **Рекомендация МСЭ-Т К.67**

### **Ожидаемые выбросы для сетей электросвязи и сигнализации под влиянием разряда молнии**

#### **Резюме**

В настоящей Рекомендации представлены характеристики (формы сигналов и пиковые значения) для ожидаемых выбросов (перенапряжения и перегрузки по току), возникающих под влиянием разряда молнии в линиях электросвязи сети доступа и в линиях сигнализации в помещениях клиентов, использующих металлические проводники. Представленные для ожидаемых выбросов значения выражаются как функция от параметров, характеризующих ток разряда молнии, которые определяют молнию в качестве источника повреждений, возникающих в результате любого типа электромагнитного взаимодействия между молнией и линией электросвязи или линией сигнализации.

Данная Рекомендация позволяет оценить эффективность защитных мероприятий (например, использования устройств защиты от выбросов), задачей которых является выдержать воздействие ожидаемого выброса тока в точке установки.

#### **Источник**

Рекомендация МСЭ-Т К.67 утверждена 13 февраля 2006 года 5-й Исследовательской комиссией МСЭ-Т (2005–2008 гг.) в соответствии с процедурой, изложенной в Рекомендации МСЭ-Т А.8.

#### **Ключевые слова**

Молния, перегрузка по току, перенапряжение, выброс, точка перехода.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Международный союз электросвязи (МСЭ) является специализированным учреждением Организации Объединенных Наций в области электросвязи. Сектор стандартизации электросвязи МСЭ (МСЭ-Т) – постоянный орган МСЭ. МСЭ-Т отвечает за изучение технических, эксплуатационных и тарифных вопросов и за выпуск Рекомендаций по ним с целью стандартизации электросвязи на всемирной основе.

На Всемирной ассамблее по стандартизации электросвязи (ВАСЭ), которая проводится каждые четыре года, определяются темы для изучения Исследовательскими комиссиями МСЭ-Т, которые, в свою очередь, выработывают Рекомендации по этим темам.

Утверждение Рекомендаций МСЭ-Т осуществляется в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции I ВАСЭ.

В некоторых областях информационных технологий, которые входят в компетенцию МСЭ-Т, необходимые стандарты разрабатываются на основе сотрудничества с ИСО и МЭК.

## ПРИМЕЧАНИЕ

В настоящей Рекомендации термин "администрация" используется для краткости и обозначает как администрацию электросвязи, так и признанную эксплуатационную организацию.

Соблюдение положений данной Рекомендации носит добровольный характер. Однако в Рекомендации могут содержаться определенные обязательные положения (например, для обеспечения возможности взаимодействия или применимости), и соблюдение положений данной Рекомендации достигается в случае выполнения всех этих обязательных положений. Для выражения необходимости выполнения требований используется синтаксис долженствования и соответствующие слова (такие, как "должен" и т. п.), а также их отрицательные эквиваленты. Использование этих слов не предполагает, что соблюдение положений данной Рекомендации является обязательным для какой-либо из сторон.

## ПРАВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

МСЭ обращает внимание на вероятность того, что практическое применение или реализация этой Рекомендации может включать использование заявленного права интеллектуальной собственности. МСЭ не занимает какую бы то ни было позицию относительно подтверждения, обоснованности или применимости заявленных прав интеллектуальной собственности, независимо от того, отстаиваются ли они членами МСЭ или другими сторонами вне процесса подготовки Рекомендации.

На момент утверждения настоящей Рекомендации МСЭ не получил извещение об интеллектуальной собственности, защищенной патентами, которые могут потребоваться для выполнения этой Рекомендации. Однако те, кто будет применять Рекомендацию, должны иметь в виду, что это может не отражать самую последнюю информацию, и поэтому им настоятельно рекомендуется обращаться к патентной базе данных БСЭ по адресу: <http://www.itu.int/ITU-T/ipr/>.

© ITU 2006

Все права сохранены. Никакая часть данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких-либо средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

|  |   |    |
|--|---|----|
| 1  | Сфера применения .....  | 1  |
| 2  | Нормативные справочные документы .....  | 1  |
| 3  | Определения .....   | 1  |
| 4  | Сокращения .....  | 3  |
| 5  | Исходная конфигурация .....   | 3  |
| 6  | Защитные меры .....   | 4  |
| 6.1  | Встроенная защита .....   | 4  |
| 6.2  | Основная защита .....   | 5  |
| 6.3  | Соединение, заземление и экранирование .....  | 5  |
| 7  | Ожидаемые выбросы под влиянием разряда молнии .....   | 6  |
| 7.1  | Непосредственный удар молнии в сооружение (источник повреждения S1): ток разряда молнии, который протекает через линии электросвязи или сигнализации, подключенные к сооружению (АТС, здание клиента или удаленный узел) .....          | 6  |
| 7.2  | Удар молнии непосредственно в сооружение или рядом с ним (источник повреждения S1 или S2): выбросы, индуцируемые в линиях электросвязи или сигнализации, расположенных внутри сооружения (АТС, здание клиента или удаленный узел) ..... | 7  |
| 7.3  | Непосредственный разряд молнии в линии электросвязи или сигнализации .....  | 9  |
| 7.4  | Разряды молнии вблизи линий электросвязи .....  | 10 |
| Приложение А – Выбросы, индуцируемые внутри сооружения, под влиянием разряда молнии, произошедшего непосредственно в сооружение или поблизости от него .....                                   |   | 13 |
| A.1  | Общие положения .....   | 13 |
| A.2  | Разряд молнии происходит поблизости от сооружения .....   | 13 |
| A.3  | Непосредственный удар молнии в сооружение .....   | 17 |
| Приложение В – Выбросы, индуцированные в линиях электросвязи под влиянием разряда молнии, произошедшего поблизости от этой линии: земля – идеальный проводник .....                            |   | 20 |
| Дополнение I – Выбросы, индуцированные внутри сооружения, под влиянием разряда молнии, произошедшим поблизости или непосредственно в данное сооружение: схема и результаты экспериментов ..... |   | 23 |
| I.1  | Введение .....  | 23 |
| I.2  | Теоретическая модель .....  | 23 |
| I.3  | Место проведения и схема экспериментов .....  | 25 |
| БИБЛИОГРАФИЯ .....   |   | 30 |

## Введение

Причинами возникновения повышенного напряжения или тока, представляющего опасность для оборудования электросвязи и сетей сигнализации, являются молнии (прямые удары молний или случаи, когда молния ударяет в непосредственной окрестности), индукция со стороны неисправных силовых линий электропередачи (включая системы тягового электроснабжения), контакт с линиями электропередачи и возрастание потенциала земли.

Методы защиты, которые носят название "защитные мероприятия", относятся к "линиям" (например, это подразумевает использование экранированных кабелей вместо неэкранированных) или же к специфическим частям системы. Системы подразделяются на следующие три широких класса:

- использование методов монтажа, которые включают соединение, заземление и экранирование, как на самом сооружении, так и на внешних линиях, которые помогают снизить проникновение энергии молнии в линию;
- использование защитных устройств, которые препятствуют поступлению излишней энергии к чувствительным частям либо с помощью ее отвода по другому пути (например, искровые промежутки), либо прерывая соединение с линией (например, предохранители) – подобные защитные устройства определяются как "*основная защита*";
- использование оборудования с достаточным уровнем электрической прочности, нагрузочной способности по току и импедансом, так что оборудование способно выдерживать существующие условия эксплуатации – данная характеристика определяется как "*встроенная защита*".

Защитные устройства (основная защита) используются против перенапряжений (устройства защиты от выбросов (SPD), например, искровые разрядники с углеродными или металлическими электродами; газоразрядные трубки, полупроводниковые защитные устройства) и против перегрузки по току (например, предохранители, нагревательные спирали, самовосстанавливающиеся защитные устройства от перегрузки по току и плавкие соединения).

Для спецификации защитных компонентов и устройств необходимо определить угрозу, возникающую по причине выбросов в определенных точках установки таких устройств. Угроза от таких выбросов должна быть ниже, чем выдерживаемый уровень для соответствующих защитных компонентов и оборудования. Выдерживаемый уровень определяется на основании специальных тестов.

В данной Рекомендации рассматриваются ожидаемые выбросы, возникающие под влиянием разряда молнии в различных точках установки таких защитных компонентов в пределах сетей электросвязи и сигнализации.

Некоторые из приведенных формул и допущений, используемых для оценки ожидаемых выбросов, являются достаточно грубыми приближениями и для их улучшения необходимо осуществить последующую доработку.

## Рекомендация МСЭ-Т К.67

### Ожидаемые выбросы на линиях электросвязи и сигнализации под влиянием разряда молнии

#### 1 Сфера применения

Областью применения данной Рекомендации является определение ожидаемых выбросов (перенапряжение и перегрузка по току), возникающих под влиянием разряда молнии в различных точках перехода сети доступа электросвязи и линий сигнализации как вне, так и внутри сооружений (к которым могут относиться здания АТС, здания клиентов и удаленные узлы).

Объектами исследования данной Рекомендации являются эффекты перенапряжения и перегрузки по току на сетях электросвязи и сигнализации, использующих металлические проводники, которые возникают под влиянием разряда молнии, являющегося источником повреждений. Повреждения зависят от места разряда молнии относительно рассматриваемой линии (см. 3.6).

Ожидаемые выбросы описываются с помощью пиковых значений и с помощью формы волны (сигнала), которые являются функцией уровня защиты от выбросов (SPL, см. 3.7) для каждого типа ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  и  $S_4$ ) источника повреждения (см. 3.6). Форма волны ожидаемого импульса считается соответствующей двойной экспоненте, описываемой длительностью фронта ( $T_1$ ) и временем уменьшения до половины значения ( $T_2$ ) для заднего фронта сигнала.

Данная Рекомендация позволяет оценить эффективность защитных мероприятий (например, эффективность устройств защиты от выбросов), которые должны выдерживать тот уровень выбросов, который будет присутствовать в точке установки.

#### 2 Нормативные справочные документы

Указанные ниже Рекомендации МСЭ-Т и другие нормативные ссылки содержат положения, которые путем ссылки на них в данном тексте составляют положения настоящей Рекомендации. На момент публикации указанные издания были действующими. Все Рекомендации и стандарты могут подвергаться пересмотру; поэтому сторонам соглашений, основанных на данной Рекомендации, предлагается изучить возможность применения последнего издания Рекомендаций и стандартов, перечисленных ниже. Список действительных на текущий момент времени Рекомендаций МСЭ-Т регулярно публикуется. Если в данной Рекомендации приводится ссылка на какой-то документ, то это не означает, что этот отдельный документ имеет статус Рекомендации.

- [1] ITU-T Lightning Handbooks, Chapter 10 (1995), *Overvoltages and overcurrents measured on telecommunication subscriber lines*.
- [2] ITU-T Recommendation K.46 (2003), *Protection of telecommunication lines using metallic symmetric conductors against lightning-induced surges*.
- [3] ITU-T Recommendation K.47 (2000), *Protection of telecommunication lines using metallic conductors against direct lightning discharges*.
- [4] ITU-T Recommendation K.56 (2003), *Protection of radio base stations against lightning discharges*.
- [5] IEC 62305-1:2006, *Protection against lightning – Part 1: General principles*.
- [6] IEC 62305-2:2006, *Protection against lightning – Part 2: Risk management*.
- [7] IEC 62305-4:2006, *Protection against lightning – Part 4: Electric and electronic systems within structures*.

### 3 Определения

В данной Рекомендации определяются следующие термины:

**3.1 опасный выброс напряжения, вызванный разрядом молнии:** выброс напряжения, при котором пиковое значение напряжения  $U_p$  равно или превышает уровень напряжения, которое способно выдерживать данное оборудование или изоляция проводников линии электросвязи.

**3.2 эквивалентная длительность заднего фронта импульса до уменьшения до половины значения ( $T_2$ ) [1]:** время уменьшения до половины значения ( $T_2$ ) для импульса напряжения или тока определяется как интервал времени, отсчитываемый от виртуального начала отсчета до первого момента, когда значение тока или напряжение уменьшается до половины от пикового значения. В качестве виртуального начала отсчета напряжения или тока принимается момент времени, когда напряжение или ток принимают соответственно значения 30% или 10% от своего пикового значения, т. е. соответственно времена  $0,3$  или  $0,1 \cdot T_1$ .

**3.3 длительность фронта или время нарастания ( $T_1$ ) [1]:** длительность фронта или время нарастания  $T_{1v}$  для импульса напряжения определяется как произведение коэффициента  $1,67$  на временной интервал между моментами времени, когда значение напряжения изменяется от 30% до 90% от своего пикового значения.

Длительность фронта  $T_{1i}$  для импульса тока определяется как произведение коэффициента  $1,25$  на временной интервал между моментами времени, когда значение тока изменяется от 10% до 90% от своего пикового значения.

**3.4 уровень молниезащиты (LPL):** набор параметров, которые определяют уровень защиты от источников помех, связанных с током разряда молнии [4].

ПРИМЕЧАНИЕ. – Понятие уровня молниезащиты используется при проектировании компонентов, предназначенных для защиты от разряда молнии, например, для определения поперечного сечения проводников, толщины металлических листов, токопроводящей способности устройств защиты от выброса, расстояния, позволяющего предотвратить опасное искрообразование. Также это понятие используется для определения параметров тестирования, которые моделируют эффект влияния молнии на такие компоненты в соответствии с заданным набором параметров для тока разряда молнии. В стандарте МЭК 62305 вводятся четыре уровня молниезащиты (от I до IV). Для каждого уровня молниезащиты определяется набор максимальных параметров тока разряда молнии (таблица 1).

**3.5 пиковое значение ( $x_p$ ) [1]:** пиковое значение ( $x_p$ ) выброса напряжения/тока определяется как максимальное значение, которое наблюдалось на протяжении всего времени выброса.

**3.6 источник повреждений:** источник повреждения определяется положением места удара молнии относительно рассматриваемой линии:

- источник повреждений  $S_1$ : разряд молнии попадает непосредственно в сооружение (АТС, здание клиента или удаленный узел), к которому подключена линия электросвязи или сигнализации;
- источник повреждений  $S_2$ : разряд попадает рядом с сооружением (АТС, здание клиента или удаленный узел), к которому подключена линия электросвязи или сигнализации;
- источник повреждений  $S_3$ : разряд попадает непосредственно в линию электросвязи, подключенную к данному сооружению (АТС, здание клиента или удаленный узел);
- источник повреждений  $S_4$ : разряд попадает рядом от линии электросвязи, подключенной к данному сооружению (АТС, здание клиента или удаленный узел).

**3.7 уровень защиты от выброса (SPL):** пиковые значения и формы сигналов для ожидаемых выбросов напряжений и токов (представляющих опасность), которые могут возникать в различных местах сетей электросвязи в тех случаях, когда источником повреждений является ток разряда молнии.

ПРИМЕЧАНИЕ. – В данной Рекомендации определяются три уровня защиты от выброса (от I до III). Для каждого уровня защиты от выбросов (SPL) оцениваются пиковые значения и форма сигнала для тех выбросов напряжений и токов, которые могут считаться представляющими опасность.

**3.8 гладкость фронта, скорость нарастания (S) [1]:** гладкость фронта, или скорость нарастания (S), представляет собой среднюю скорость изменения напряжения или тока. Это значение может быть определено как соотношение пикового значения  $x_p$  и длительности фронта  $T_1$ :

$$S = \frac{x_p}{T_1} \quad (1)$$



**3.9 выброс:** временное превышение напряжения или тока или же обеих этих величин, которое возникает на линии электросвязи под влиянием внешнего электрического источника.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Типичными примерами электрических источников являются молнии и силовые системы переменного/постоянного тока.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Влияние электрического источника может распространяться одним из следующих способов: с помощью электрического поля (емкостной), с помощью магнитного поля (индуктивный), с помощью кондуктивного (резистивного) способа или же с помощью электромагнитного поля.

**3.10 выброс по причине разряда молнии:** выброс, который происходит в результате разряда молнии при помощи одного из видов электромагнитного взаимодействия (кондуктивное, индуктивное или емкостное).

ПРИМЕЧАНИЕ. – Выброс характеризуется следующими пятью параметрами: пиковое значение, длительность фронта ( $T_1$ ), время спада до половинного значения,  $T_2$ , (или же временные параметры  $T_1/T_2$ ), гладкость и специфическая (удельная) энергия.

**3.11 устройство защиты от выбросов (SPD):** устройство, которое ограничивает напряжение, возникающее на определенном порту или портах под влиянием выброса, когда значение напряжения превышает некий предустановленный уровень.

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Устройство защиты от выбросов (SPD) объединяет схему защиты и патрон (держатель).

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Могут поддерживаться некие вторичные функции, такие как ограничение по току с целью ограничения текущего в нагрузке тока.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Обычно схема защиты использует для защиты от выбросов по крайней мере один нелинейный компонент ограничения по напряжению.

## 4 Сокращения

В данной Рекомендации используются следующие сокращения:

|     |                               |
|-----|-------------------------------|
| BN  | сеть соединений               |
| CBN | ОСС, общая сеть соединений    |
| E   | АТС                           |
| LPL | уровень молниезащиты          |
| MDF | главный распределительный щит |
| MET | главная заземляющая шина      |
| NT  | оконечный узел                |
| S   | абонент                       |
| SPD | устройство защиты от выбросов |
| SPL | уровень защиты от выбросов    |

## 5 Исходная конфигурация

На рисунке 1 показана исходная конфигурация для линий электросвязи с металлическими симметричными проводниками, где можно заметить опорные узлы сети и соединяющие их кабельные секции.

К показанным на рисунке 1 Точкам перехода относится следующая информация [2]:

- Точка перехода L: Переход между интерфейсом оборудования, расположенного в здании АТС, и внешним кабелем;
- Точка перехода E: Вход в здание АТС, например, главный распределительный щит (MDF);
- Точка перехода P: Переход между подземным кабелем с бумажной изоляцией и подземным кабелем с пластмассовой изоляцией;

- Точка перехода С: Переход между подземным и воздушным кабелем;
- Точка перехода D: Переход между экранированным и неэкранированным воздушным кабелем;
- Точка перехода S: Вход в здание клиента;
- Точка перехода А: Переход между интерфейсом оборудования, установленного внутри здания клиента, и установленным снаружи кабелем;
- Точка перехода М: Переход между интерфейсом оборудования, установленного внутри здания АТС, и установленным внутри этого здания кабелем;
- Точка перехода I: Переход между интерфейсом оборудования, установленного внутри здания клиента, и установленным внутри этого здания кабелем;

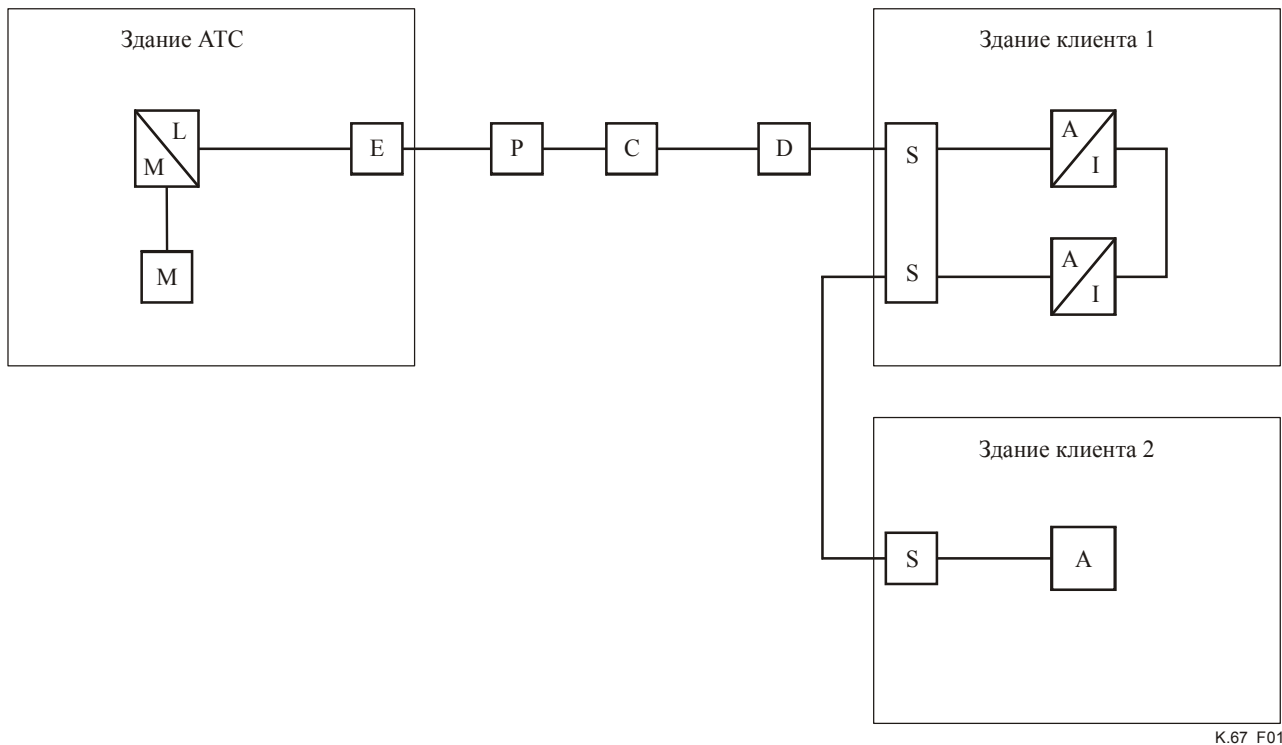


Рисунок 1/К.67 – Исходная конфигурация

## 6 Защитные меры

### 6.1 Встроенная защита

Для того чтобы обеспечить защиту оборудования и снизить риск его повреждения, необходимо использовать оборудование с соответствующей диэлектрической прочностью, с соответствующей допустимой нагрузкой по току и с соответствующим импедансом, которые позволяют выдерживать заданные условия эксплуатации (т. е. необходимо учитывать присущие данному оборудованию характеристики встроенной защищенности).

Требования по защищенности оборудования, которое используется в различных узлах сетей электросвязи, были определены в Рекомендациях МСЭ-Т К.20, К.45 и К.21, которые соответственно определяют требования к оборудованию, установленному в здании АТС, в сети доступа и в зданиях клиентов.

С точки зрения защиты от разряда молнии, защищенность позволяет оборудованию выдержать большинство случаев, когда источником наведенного выброса является разряд молнии, произошедший поблизости от линии (см. 7.4). Так как наиболее часто встречаются именно такие выбросы, то использование дополнительных защитных мер (основная защита) ограничивается только "незащищенными" сооружениями, к которым относят на основании оценки степени существующего риска [2, 3, 6].

## 6.2 Основная защита

Задачей основной защиты является предотвратить поступление чрезмерной энергии к чувствительным частям системы электросвязи и сигнализации (например, к изоляции проводов и оборудования). Для этих целей необходимо установить адекватную основную защиту, а также соответствующим образом подобрать характеристики этой защиты.

Эффективность основной защиты определяется ее способностью проводить возникающие при выбросе токи (для устройств с ограничением напряжения, GDT) или выдерживать возникающие при выбросе напряжения (для устройств с ограничением тока, предохранителей). В таблице 1 приводятся параметры молнии, которые определяют максимальные значения возникающих при выбросе напряжений и токов в виде функции от уровня молниезащиты (LPL). Приведенные максимальные значения напряжений и токов связаны со следующими уровнями защиты от выбросов (SPL): SPL I = 0,01, SPL II = 0,02 и SPL III = 0,05, что позволяет определить вероятность того, что опасное значение выброса напряжения или тока будет равно или превысит соответствующее пиковое значение.

**Таблица 1/К.67 – Максимальные значения параметров разряда молнии в соответствии с уровнями молниезащиты (LPL)**

| Параметры тока                   |                             | Символ    | Ед.     | Уровень молниезащиты (LPL) |             |              |    |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------|---------|----------------------------|-------------|--------------|----|
|                                  |                             |           |         | I<br>(99%)                 | II<br>(98%) | III<br>(95%) | IV |
| <b>Первый короткий удар</b>      | Пиковый ток                 | $I_p$     | кА      | 200                        | 150         | 100          |    |
|                                  | Заряд короткого удара       | Qshort    | Кл      | 100                        | 75          | 50           |    |
|                                  | Удельная энергия            | W/R       | кДж/Ом  | 10 000                     | 5 625       | 2 500        |    |
|                                  | Временные параметры         | $T_1/T_2$ | мкс/мкс | 10/350                     |             |              |    |
| <b>Последующий короткий удар</b> | Пиковый ток                 | $I_p$     | кА      | 50                         | 37,5        | 25           |    |
|                                  | Средняя скорость нарастания | di/dt     | кА/мкс  | 200                        | 150         | 100          |    |
|                                  | Временные параметры         | $T_1/T_2$ | мкс/мкс | 0,25/100                   |             |              |    |
| <b>Долгий удар</b>               | Заряд долгого удара         | Qlong     | Кл      | 200                        | 150         | 100          |    |
|                                  | Временной параметр          | Tlong     | с       | 0,5                        |             |              |    |
| <b>Вспышка</b>                   | Заряд молнии                | Qflash    | Кл      | 300                        | 225         | 150          |    |

## 6.3 Соединение, заземление и экранирование

Использование методов монтажа, которые обеспечивают соединение, заземление и экранирование, позволяет уменьшить взаимодействие между молнией и линией электросвязи. В том случае, если молния ударяет непосредственно в линию или поблизости от нее, ток молнии распределяется по ОСС сооружения и сети соединения оборудования, таким образом, обеспечивая экранирование для внутренних линий. Эффективным средством для уменьшения напряжения и тока, которые возникают в проводах связи, может являться экран или канал, полностью охватывающий провод. Критическим параметром для эффективности экранирования кабеля является его передаточный импеданс, для плотных (сплошных) экранов при частоте разряда молнии он приблизительно равен сопротивлению экрана по постоянному току.

Основная защита в сочетании с мероприятиями по соединению и заземлению позволяют создать электромагнитный барьер для сооружений и оборудования, который помогает снизить проникновение внешних электромагнитных возмущений внутрь этих объектов.

## 7 Ожидаемые выбросы под влиянием разряда молнии

### 7.1 Непосредственный удар молнии в сооружение (источник повреждения S1): ток разряда молнии, который протекает через линии электросвязи или сигнализации, подключенные к сооружению (АТС, здание клиента или удаленный узел)

При непосредственном попадании молнии в сооружение ток разряда молнии течет в систему заземления сооружения, а также в сервисы, которые подключены к данному сооружению. Таким образом, часть тока молнии непосредственно или через устройства молниезащиты поступает на защитную оболочку или проводники кабеля, входящего в состав линии электросвязи или сигнализации, так как такой кабель является одним из сервисов, подключенных к данному сооружению.

Параметры тока молнии – это те параметры, которые приводятся в таблице 1, для первого разряда молнии в виде функции выбранного уровня молниезащиты (LPL). Таким образом, ток разряда молнии, который поступает на вход линии электросвязи или сигнализации, описывается формой волны 10/350 мкс и пиковым значением  $I_f$ .

В качестве первой аппроксимации можно принять, что 50% тока разряда молнии ( $I$ ) течет по системе заземления, а оставшиеся 50% тока распределяется между  $n$ -ным количеством сервисов, подключенных к данной структуре.

Если подключенная линия электросвязи или сигнализации не имеет экрана или не проложена по металлическому каналу, то каждый из  $m$  проводников линии несет равную часть ( $I_f$ ) от пикового значения тока разряда молнии, который оценивается с помощью следующего уравнения:

$$I_f = \frac{0,5 \times I_p}{n \times m} \quad \text{для неэкранированной линии} \quad (2)$$

Если подключенные линии являются экранированными (или же проложены в металлических каналах) и соединяются на вводе в сооружение, то пиковое значение ( $I_f$ ) тока, который появляется на входе каждого из  $m$  проводников, выражается следующим образом:

$$I_f = \frac{0,5 \times I_p \times R_s}{n \times (m \times R_s + R_c)} \quad \text{для экранированной линии}, \quad (3)$$

где:

$R_s$  = омическое сопротивление для единицы длины экрана или металлического канала;

$R_c$  = омическое сопротивление проводника единичной длины.

Напряжение разомкнутой цепи между проводником и главной заземляющей шиной (main earthing terminal, MET) приблизительно пропорционально произведению сопротивлению заземления и той доле тока разряда молнии, которая течет к сети заземления в случае неэкранированного кабеля. Если кабель является экранированным, то напряжение разомкнутой цепи между проводником и главной заземляющей шиной, которая соединена с экраном кабеля, приблизительно пропорционально произведению сопротивления заземления и той доле тока, которая протекает через экран. При этом значение напряжения ограничивается напряжением пробоя между центральными проводниками и экраном (например, 5 кВ). Если экран кабеля заземлен на периодических расстояниях, то текущий по экрану ток ослабевает по мере своего распространения от места разряда молнии. Распространение выброса по кабелю приводит к дисперсии и увеличению длительности заднего фронта импульса (decay time).

Даже если рассматривать возможную ионизацию земли вблизи электродов, то величина полученного в результате напряжения, вероятно, может оказаться достаточно высокой для того, чтобы вызвать срабатывание основной защиты или же привести к пробое изоляции проводника при отсутствии защиты. Следовательно, здесь не рассматриваются детально процедуры для расчета пикового напряжения. Это относится как к неэкранированным, так и к экранированным линиям электросвязи.

## 7.2 Удар молнии непосредственно в сооружение или рядом с ним (источник повреждения S1 или S2): выбросы, индуцируемые в линиях электросвязи или сигнализации, расположенных внутри сооружения (АТС, здание клиента или удаленный узел)

Разряд молнии, который ударяет непосредственно в сооружение или поблизости от него, благодаря производной по времени тока разряда молнии ( $di/dt$ ), индуцирует выброс синфазных напряжений в линии электросвязи или сигнализации, расположенной внутри сооружения (АТС, здание клиента или удаленный узел). Пиковое значение напряжения  $V_{io}$ , которое создается в разомкнутой цепи, выражается следующим уравнением:

$$V_{io} = L_M \times \frac{di}{dt} = L_M \times \frac{I_p}{T_1}, \quad (4)$$

где:

$L_M$  = взаимная индуктивность между схемой, в которой индуцируется напряжение, и током разряда молнии;

$I_p$  = пиковое значение тока разряда молнии;

$T_1$  = длительность фронта тока разряда молнии.

Параметр, который характеризует ток разряда молнии, – это средняя скорость нарастания ( $di/dt$ ), которая выражается как отношение пикового значения ( $I_p$ ) к длительности фронта ( $T_1$ ) (см. 3.8) для последующих ударов (наименее благоприятный случай). В таблице 1 эти параметры приводятся в виде функции от уровня молниезащиты (LPL).

Форма волны, которая индуцируется в разомкнутой схеме, отличается очень малой длительностью (порядка нескольких микросекунд, например, от 2 до 10 микросекунд), а длительность фронта практически не отличается от длительности фронта для последующих разрядов молнии (т. е. 0,25 мкс). Это было продемонстрировано в ходе измерения напряжения, индуцируемого в витке с помощью искусственно создаваемой молнии (см. Дополнение I).

Если пренебречь омическим сопротивлением проводов схемы (наименее благоприятные условия), то пиковое значение тока короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) выражается с помощью следующей формулы:

$$I_{sc} = \frac{V_{oi} \times T_1}{L_S} \quad (5)$$

или

$$I_{sc} = \frac{L_M}{L_S} \times I_p, \quad (6)$$

где:

$L_S$  = собственная индуктивность витка.

Для тока короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) параметром тока разряда молнии является пиковое значение ( $I_p$ ) для первого разряда молнии (наименее благоприятный случай), которые приводятся в таблице 1 как функция выбранного уровня молниезащиты (LPL). Данный сигнал соответствует форме тока разряда молнии (см. Дополнение I), таким образом, для наименее благоприятного случая форма сигнала описывается формой 10/350 мкс.

Пиковые значения для напряжения разомкнутой цепи ( $V_{oi}$ ), возникающие под влиянием последующих разрядов молнии, и тока короткого замыкания ( $I_{si}$ ), возникающие под влиянием первого разряда молнии, представлены в таблице 2 для различных значений уровня защиты от выбросов (SPL). Как показано в Приложении А (А.2 и А.3), эти значения оценивались для неэкранированного витка с площадью  $50 \text{ м}^2$  ( $h = 5 \text{ м}$ ;  $e = 10 \text{ м}$ ), который располагался внутри неэкранированного сооружения или здания.

**Таблица 2/К.67 – Ожидаемые значения выбросов напряжения для разомкнутой цепи и тока короткого замыкания для одного проводника в различных узлах линии электросвязи или сигнализации, вызываемые под влиянием непосредственных ударов молнии в сооружение (S<sub>1</sub>) и в линию электросвязи (S<sub>3</sub>), а также ударов поблизости от сооружения (S<sub>2</sub>)**

|     | Непосредственный удар в сооружение источник повреждений S <sub>1</sub>  |   | Удар поблизости от сооружения источник повреждений S <sub>2</sub>       |  | Непосредственный удар в линию электросвязи источник повреждений S <sub>3</sub> |   |   |
|-----|---|---|---|--|--|---|---|
|     | Узлы E и S  | Узлы L, A, M и I (Примечание 1)<br>(единственный проводник, идущий вниз)<br>(см. таблицу A.2) | Узлы L, A, M и I (Примечание 1)<br>(см. таблицу A.1)                    |  | Узлы L, E, P   | Узлы C, D, S, A   |   |
| SPL | (часть тока при прямом ударе молнии)<br>форма волны: 10/350 мкс<br>[кА] | (напряжение, индуцируемое последующими разрядами)<br>форма волны: 0,25/2 мкс<br>[кВ]          | (ток, индуцируемый при первом ударе)<br>форма волны: 10/350 мкс<br>[кА] | (напряжение, индуцируемое последующими разрядами)<br>форма волны: 0,25/2 мкс<br>[кВ] | (ток, индуцируемый при первом ударе)<br>форма волны: 10/350 мкс<br>[кА]        | (часть тока при прямом ударе молнии)<br>форма волны: 10/350 мкс<br>[кА] | (часть тока при прямом ударе молнии)<br>форма волны: 10/350 мкс<br>[кА] |
| I   | Уравнение (2) или (3)   | 250   | 6   | 5  | 0,1  | 0,50<br>(Примечание 2)  | Уравнение (12) или (14)   |
| II  | Уравнение (2) или (3)   | 190   | 4,5   | 3,5  | 0,07   | 0,50<br>(Примечание 2)  | Уравнение (12) или (14)   |
| III | Уравнение (2) или (3)   | 125   | 3   | 2,2  | 0,05   | 0,50<br>(Примечание 2)  | Уравнение (12) или (14)   |

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Условия, при которых выполнялись вычисления: незэкранированное сооружение; незэкранированная линия, в которой индуцируется напряжение; размеры витка: 50 м<sup>2</sup> (h = 5 м; e = 10 м); радиус проводника витка: 0,5 мм.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – В частных случаях могут использоваться уравнения (12) или (14). Напряжение пробоя между линией и землей предполагается равным 100 кВ, а линия в рассматриваемой точке имеет короткое замыкание на землю.

Для индуктивных линий с различной площадью витка, которые имеют одинаковую длину витка (e), приведенные в таблице 2 значения выбросов напряжения должны быть умножены на следующий коэффициент (K<sub>r</sub>):

$$K_r = A/50 \quad (A - \text{площадь витка, м}^2) \quad (7)$$

Далее, уравнение (5) позволяет оценить ток короткого замыкания (I<sub>sc</sub>), вычисляя значение собственной индуктивности (L<sub>s</sub>) для нового витка.

Для экранированных линий приведенные в таблице 2 значения напряжения выброса могут быть уменьшены на коэффициент K<sub>s3</sub>, который выражается следующим уравнением:

$$K_{s3} = K_r \times K_{ss}, \quad (8)$$

где:

$$K_{ss} = \frac{V_{cs}}{V_{io}} \quad (9)$$

V<sub>cs</sub> = напряжение между проводником и экраном, выражается следующим уравнением:

$$V_{cs} = R \times I_{sc} \quad (10)$$

Используя для V<sub>io</sub> и I<sub>sc</sub> соответственно уравнения (4) и (5), из уравнения (8) получаем:

$$K_{ss} = \frac{R \times T_1}{L_s} \quad \text{действительно для } (L_s/R) \gg T_1, \quad (11)$$

где:

$K_{ss}$  = значение экранирующего фактора для данного экрана ( $R$  – сопротивление экрана, выраженное в  $\Omega$ ).

ПРИМЕЧАНИЕ. – Уравнение (10) действительно для трубчатых защитных оболочек. Для тех случаев, когда используется защитный экран в виде оплетки, данное уравнение является приближенным.

Значения тока выброса, индуцируемого в витках с различной площадью, могут быть оценены исходя из того, что как индуцированное напряжение выброса, так и индуктивность витка имеют различные значения (см. А.2 и А.3).

### 7.3 Непосредственный разряд молнии в линии электросвязи или сигнализации

Существует две возможные ситуации:

- a) место удара молнии располагается достаточно далеко от структуры;
- b) место удара молнии располагается вблизи от структуры.

В обоих случаях ток разряда молнии, который поступает на вход линии электросвязи или сигнализации, описывается формой 10/350 мкс и пиковым значением  $I_f$ . Если не учитывать эффекты, связанные с распространением, то та же форма 10/350 мкс относится и к форме тока, который будет наблюдаться в других местах сети (АТС, зданиях клиента или в удаленных узлах).

В случае а) полное значение пикового тока в линии, в наиболее неблагоприятном случае, выражается удвоенным напряжением пробоя между линией и землей, деленным на импеданс выброса линии (например,  $2 \times 100 \text{ кВ}/400 \text{ ом} = 500 \text{ А}$ ). Этот наименее благоприятный случай не зависит от уровней молниезащиты LPL I–IV. Однако если линия экранирована и для экрана периодически установлено заземление, то необходимо использовать анализ, относящийся к ситуации б).

В случае б) необходимо учитывать распределение тока молнии по двум возможным направлениям распространения в сети электросвязи, а также пробой изоляции на землю. В качестве первой аппроксимации можно предположить, что 50% тока разряда молнии в результате пробоя утекает на землю, а половина оставшихся 50% тока распространяется в двух направлениях между  $n$  сервисами, расположенным вблизи друг от друга.

Если линия электросвязи или сигнализации не является экранированной и она не проложена в металлическом канале, то каждый из  $m$  проводов линии переносит равную часть ( $I_f$ ) от пикового тока молнии, для оценки может использоваться следующая формула:

$$I_f = \frac{0,25 \times I_p}{n \times m} \quad \text{для неэкранированной линии,} \quad (12)$$

где  $n = 1$  или  $2$ ; второй вариант относится к случаю, когда линии электросвязи и линии электропередачи расположены достаточно близко друг от друга, например, когда они используют одни и те же опоры.

Значение, выраженное с помощью формулы (12), должно быть равно или меньше следующего значения:

$$I_f \leq 8 \times A \quad [\text{кА}], \quad (13)$$

где  $A$  – это площадь поперечного сечения проводника линии электросвязи или сигнализации [ $\text{мм}^2$ ].

Для экранированных (или проложенных в металлических каналах) линий, подключенных к вводу в сооружение, пиковое значение ( $I_f$ ) тока, поступающего на каждый из  $m$  проводников, выражается как:

$$I_f = \frac{0,25 \times I_p \times R_s}{n \times (m \times R_s + R_c)} \quad \text{для экранированной линии,} \quad (14)$$

где:

$R_s$  = омическое сопротивление для единичной длины экрана или металлического канала;

$R_c$  = омическое сопротивление проводника единичной длины.

В разомкнутой схеме напряжение между проводником и экраном приблизительно пропорционально произведению сопротивления экрана на долю тока молнии, которая течет через экран. При этом значение напряжения ограничивается напряжением пробоя между центральными проводниками и экраном (например, 5 кВ). Если экран кабеля заземлен на периодических расстояниях, то текущий по экрану ток ослабевает по мере своего распространения от места разряда молнии. Распространение выброса по кабелю приводит к дисперсии и увеличению длительности заднего фронта импульса (decay time).

Для здания АТС обычно молния ударяет в воздушную линию (несколько пар) на достаточно далеком расстоянии от сооружения. Для этой ситуации можно использовать значения, приведенные в таблице 2. Для отдельных ситуаций могут использоваться уравнения (12), (13) и (14).

Для зданий, где установлено оборудование клиентов, в общем случае наихудшей является ситуация, когда место удара молнии располагается вблизи от здания. Для данной ситуации могут использоваться значения, полученные с помощью уравнений (12), (13) и (14).

**ПРИМЕЧАНИЕ.** – Имеется мало информации о токах выброса, вызванных прямым попаданием молнии в линии электросвязи. В Главе 10 справочника Lightning Handbook [1] отчет об исследовании в Канаде сообщает, что "событие с током 300 А и временем уменьшения в половину заднего фронта, равным 300 мкс, явилось результатом прямого удара молнии в опору линии, расположенную приблизительно в 200 м от углеродного измерительного пункта. Этот пункт также был оснащен счетчиком уровня и цифровым монитором формы сигналов. Кабель и опора линии получили серьезные повреждения". Не существует никакой информации о пиковом значении тока молнии, которая ударила в линию. Если предположить, что ток выброса с величиной 300 А был вызван током разряда молнии величиной приблизительно 30 кА, который соответствует вероятности 50%, тогда возможно оценить значения, равные 2 или 1 кА, которые соответственно отвечают уровням молниезащиты LPL I или III. Аналогичные результаты могут быть получены с помощью уравнения (6) при  $n = 1$  и  $m = 20$ , когда ток разряда молнии равен 200 кА (LPL I) или 100 кА (LPL III).

## 7.4 Разряды молнии вблизи линий электросвязи

### 7.4.1 Общие положения

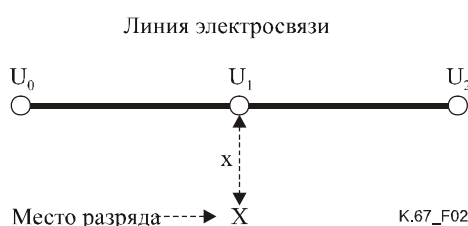
Пиковые значения напряжений и токов выброса, вызванных разрядом молнии, которые могут возникать в некоторых точках перехода сети электросвязи, изучались в ходе нескольких исследований, проводившихся в различных странах. Результаты этих обзоров представлены в Главе 10 справочника Lightning Handbook [1].

Требования к внутренней сопротивляемости оборудования электросвязи, которые определяются в Рекомендациях МСЭ-Т К.20, К.21 и К.45, основываются на результатах исследований, которые приводятся в справочнике Lightning Handbook [1].

Использование дополнительных защитных мер (основная защита) ограничивается только "незащищенными" сооружениями, к которым относят на основании оценки степени существующего риска [2, 3, 6].

Наименее благоприятный вариант выброса, который рассматривается в данной Рекомендации, показан на рисунке 2. Предполагается, что место разряда молнии находится на равных расстояниях от окончаний линии и на расстоянии "x" от самой линии электросвязи, в качестве которой рассматривается воздушная линия с высотой 6 м ( $h = 6$ ).

Возникающие при выбросе ожидаемые опасные напряжения и токи оценивались в средней точке и на окончаниях линии.



**Рисунок 2/К.67 – Исходная конфигурация для оценки выброса, индуцированного разрядом молнии, ударившим рядом с этой линией (наименее благоприятный случай)**



Согласно определению уровня защиты от выброса (SPL):

$$SPL = \frac{N_T(U_{SPL})}{N_T(U_R)}, \quad (15)$$

где:

$U_{SPL}$  = напряжение, соответствующее выбранному уровню защиты от выброса (SPL);

$U_R$  = опорное напряжение (со значением ниже  $U_{SPL}$ ), которое определяет минимальный уровень напряжения сопротивляемости для оборудования, соединенного с линией или с изоляцией проводника линии;

$N_T(U)$  = полное количество разрядов, которые индуцируют напряжение, равное или превосходящее уровень напряжения  $U$ .

Метод вычисления значений  $N_T$  и  $U_{SPL}$  описывается в Приложении В для случая воздушной линии, как экранированной, так и неэкранированной, которая проходит над идеально проводящей почвой (землей).

Приложение В также предлагает способ для оценки токов короткого замыкания, связанных с опасными выбросами напряжения.

#### 7.4.2 Рассчитанные значения (земля – идеальный проводник)

В таблице 5 приводятся пиковые значения опасных выбросов напряжения для разомкнутой цепи и токов для короткозамкнутой цепи в точках перехода Р, С и D (расположенных вблизи от средней точки) для неэкранированной воздушной линии в зависимости от различных значений уровней защиты от выброса (SPL). Форма сигнала выброса напряжения и тока может сильно изменяться в зависимости от характеристик тока молнии (форма сигнала, пиковое значение и скорость), в зависимости от расстояния между местом удара и линией и в зависимости от характеристик линии (заземляющие соединения, экранирование и т. д.). Если принять ток молнии постоянным и рассматривать неэкранированную линию, то увеличение расстояние между местом удара молнии и линией приводит к уменьшению значения индуцируемого напряжения и тока, а также к увеличению продолжительности формы сигналов. Экранирование линии также приводит к снижению индуцируемого напряжения и тока, а также к растягиванию формы сигналов во времени.

В таблице 1 для токов разряда молнии скорость обратного удара (молнии) равняется 130 м/мкс и для индуцированного напряжения, соответствующего выбранному диапазону защиты от выбросов (SPL) (например, от 0,01 до 0,05), форма волны индуцированного напряжения и тока для неэкранированной линии может быть представлена двойной экспоненциальной волной с параметрами 8/20 мкс. Для экранированной линии пиковое значение ниже, а форма волны имеет большую продолжительность, таким образом, она лучше описывается двойной экспоненциальной волной с параметрами 10/700 мкс.

ПРИМЕЧАНИЕ. – Для неэкранированной воздушной линии форма волны 8/20 мкс была вычислена на основании статьи [5], где предполагается, что скорость обратного удара молнии равняется 130 м/мкс. Для экранированной линии предполагается, что эта форма волны согласуется с результатами измерений.

#### 7.4.3 Измеренные значения (земля – не идеальный проводник)

Выбросы напряжения и тока, вызванные разрядом молнии, которые могут появляться в сетях доступа, измерялись в нескольких странах и результаты этих измерений приводятся в Главе 10 книги *Lightning Handbook* [1]. Эти данные суммируются в таблице 3.

Данные были получены для находящихся в эксплуатации линий, которые объединяли как воздушные, так и подземные экранированные секции, а часто также короткий неэкранированный участок поблизости от клиента (*абонентский ввод*). Для большинства этих данных измерения проводились как на стороне АТС, так и на стороне клиента. В таблице 3 напряжение  $U_e$  – это напряжение между парой и экраном, измеренное на стороне АТС, а  $i_{sce}$  – это соответствующий ток короткого замыкания. Далее,  $U_s$  – это напряжение в разомкнутой схеме между парой (или одним проводником из пары) и землей на стороне клиента, а  $i_{scs}$  – это соответствующий ток короткого замыкания.

**Таблица 3/К.67 – Измеренные значения выбросов напряжения для разомкнутой схемы и выбросов тока для короткозамкнутой схемы на стороне АТС и на стороне клиента**

| Вероятность | Страна АТС |               | Страна клиента |               |
|-------------|------------|---------------|----------------|---------------|
|             | $U_e$ [В]  | $i_{sce}$ [А] | $U_s$ [В]      | $i_{scs}$ [А] |
| 0,01        | 860        | 17            | 2 300          | 23            |
| 0,02        | 680        | 13            | 1 640          | 16            |
| 0,05        | 480        | 8             | 1 020          | 10            |

Предполагая, что сопротивление экрана  $R_s = 5$  Ом, сопротивление заземления экранированного соединения с землей на стороне клиента  $R_t = 40$  Ом, импеданс выброса  $Z = 100$  Ом для проложенных в земле и  $Z = 400$  Ом для воздушных секций, то можно получить следующие значения:  $\eta_{ss} = 0,05$  и  $\eta_{se} = 0,1$ .

Принимая эти значения для коэффициента экранирования, исходя из результатов измерения, можно оценить усеченное распределение ( $U_R = 50$  В) на стороне АТС и ( $U_R = 150$  В) на стороне клиента. В таблице 4 приводятся представляющие опасность пиковые значения токов и напряжений в виде функции от уровня защиты от выбросов (SPL).

**Таблица 4/К.67 – Измеренные опасные выбросы напряжения в разомкнутой цепи и тока в короткозамкнутой цепи на стороне АТС и на стороне клиента**

| Уровень защиты от выбросов (SPL) | Страна АТС |               | Страна клиента |               |
|----------------------------------|------------|---------------|----------------|---------------|
|                                  | $U_e$ [В]  | $i_{sce}$ [А] | $U_s$ [В]      | $I_{scs}$ [А] |
| I                                | 1 000      | 20            | 3 500          | 35            |
| II                               | 750        | 15            | 2 500          | 25            |
| III                              | 500        | 10            | 1 500          | 15            |

Эти значения приводятся в таблице 5.

**Таблица 5/К.67 – Ожидаемые напряжения разомкнутой цепи и тока короткого замыкания для проводников в различных узлах линии электросвязи или сигнализации, возникающие под влиянием разрядов молнии поблизости от линии электросвязи ( $S_4$ )**

| Разряды молнии вблизи линии электросвязи или сигнализации (наименее благоприятный случай) для источника повреждений $S_4$ |                                   |   |                                   |  |   |  |   |   |                                     |    |
|---|-----------------------------------|---|-----------------------------------|--|---|--|---|---|-------------------------------------|----|
| Узлы L, E, P и C  |                                   | Узлы D, S и A                             |                                   | Узлы L, E, P и C (рассчитаны при $\eta_s = 0,05$ )   | Узлы L, E, P и C (измерены)                 | Узлы D, S и A (рассчитаны при $\eta_e = 0,1$ ) | Узлы D, S и A (измерены)                    |   |                                     |    |
| Неэкранированная линия (Примечание)   |                                   |   |                                   | Линия, состоящая из: подземной экранированной секции (узлы E-C), воздушной экранированной секции (узлы C-D) и воздушной неэкранированной секции (узлы C-S) |   |  |   |   |                                     |    |
| Индукцированное напряжение: 8/20 мкс [кВ]   | Индукцированный ток: 8/20 мкс [А] | Индукцированное напряжение: 8/20 мкс [кВ] | Индукцированный ток: 8/20 мкс [А] | Индукцированное напряжение: 10/700 мкс [кВ]  | Индукцированное напряжение: 10/700 мкс [кВ] | Индукцированный ток: 10/350 мкс [А]            | Индукцированное напряжение: 10/700 мкс [кВ] | Индукцированное напряжение: 10/700 мкс [кВ] | Индукцированный ток: 10/350 мкс [А] |    |
| I   | 44                                | 110                                       | 64                                | 160  | 1   | 1  | 20  | 6,4   | 3,5                                 | 35 |
| II  | 23                                | 60  | 34                                | 85   | 0,75  | 0,8  | 15  | 3,4   | 2,5                                 | 25 |
| III   | 10                                | 25  | 14                                | 35   | 0,5   | 0,6  | 10  | 1,4   | 1,5                                 | 15 |

ПРИМЕЧАНИЕ. – Условия, при которых проводились вычисления: воздушная линия над идеально проводящей землей.

## Приложение А

### Выбросы, индуцируемые внутри сооружения, под влиянием разряда молнии, произошедшего непосредственно в сооружение или поблизости от него

#### А.1 Общие положения

Вызванные молнией импульсные выбросы, возникающие в витках, образованных проводами рассматриваемой структуры, играют важную роль во многих Рекомендациях МСЭ-Т серии К. Подобные выбросы характеризуются формой волны и пиковым значением.

В Приложении I показаны формы сигналов для индуцированных выбросов напряжения, основанные на результатах измерений, выполненных на экспериментальных установках.

Пиковые значения напряжения в разомкнутой цепи ( $V_{io}$ ) и тока короткого замыкания ( $I_{io}$ ), которые наводятся в витке, оцениваются для случая удара молнии поблизости или случая прямого удара молнии в сооружение соответственно в разделах А.2 и А.3.

#### А.2 Разряд молнии происходит поблизости от сооружения

Пиковое значение напряжения ( $V_{io}$ ) для разомкнутой цепи, которое индуцируется в витке, расположенном внутри здания, при разряде молнии вблизи этого здания может быть рассчитано с помощью уравнения (4). Здесь взаимная индуктивность ( $L_M$ ) выражается с помощью следующего аппроксимирующего уравнения (в предположении, что падающее магнитное поле может быть представлено в виде плоской волны) [3, 6]:

$$L_M = 0,2 \times \eta \times K_s \times h \times \ln \left( \frac{f + d + e}{f + d} \right) \text{ [мкГн]}, \quad (\text{A.1})$$

где (см. рисунок А.1):

$h$  = ширина или высота витка [м];

$e$  = длина витка [м];

$f$  = расстояние от канала разряда молнии до стены сооружения [м];

$d$  = расстояние от витка до стены сооружения;

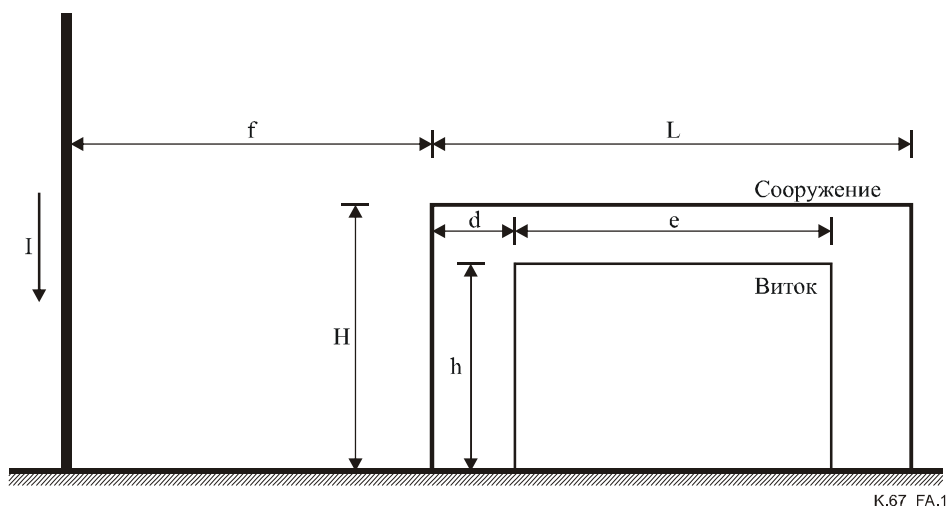
$\eta = 0,12 \times w$  = коэффициент экранирования для экрана сооружения (экран LPZ 1), где  $w \leq 5$  м – это ширина элементов построенного в виде сетки пространственного экрана [5, 6];

$K_s$  = коэффициент экранирования, который учитывает влияние экрана кабеля;

и:

$I_{ps}$  = пиковое значение последующих ударов молнии (таблица 1) [кА];

$T_1 = 0,25$  = время нарастания фронта для последующих ударов (таблица 1) [мкс].



**Рисунок А.1/К.67 – Удар молнии происходит поблизости от сооружения**

Если пренебречь омическим сопротивлением проводов (наименее благоприятный случай), то ток короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) можно оценить с помощью формулы (5) или (6), где собственная индуктивность витка ( $L_S$ ), которая выражается в мкГн, вычисляется с помощью следующего уравнения:

$$L_S = 0,8 \times \sqrt{e^2 + h^2} - 0,8 \times (e + h) + 0,4 \times e \times \ln \left[ \frac{\frac{2 \times h}{r}}{e + \sqrt{e + \left(\frac{h}{e}\right)^2}} \right] + 0,4 \times h \times \ln \left[ \frac{\frac{2 \times e}{r}}{e + \sqrt{e + \left(\frac{e}{h}\right)^2}} \right], \quad (A.2)$$

где:

$r$  = радиус провода, из которого сделан виток [м].

Индуктируемые во внутреннем витке выбросы напряжения, которые считаются представляющими опасность, оцениваются с помощью уравнения (4).

Согласно определению SPL:

$$SPL = \frac{N_T(U_{SPL})}{N_T(U_R)}, \quad (A.3)$$

где:

$U_{SPL}$  = напряжение, которое соответствует выбранному уровню защиты от выбросов (SPL);

$U_R$  = опорное напряжение (его значение должно быть меньше значения  $U_{SPL}$ ), которое определяет минимальный уровень напряжения сопротивляемости для оборудования, соединенного с линией или с изоляцией проводов линии;

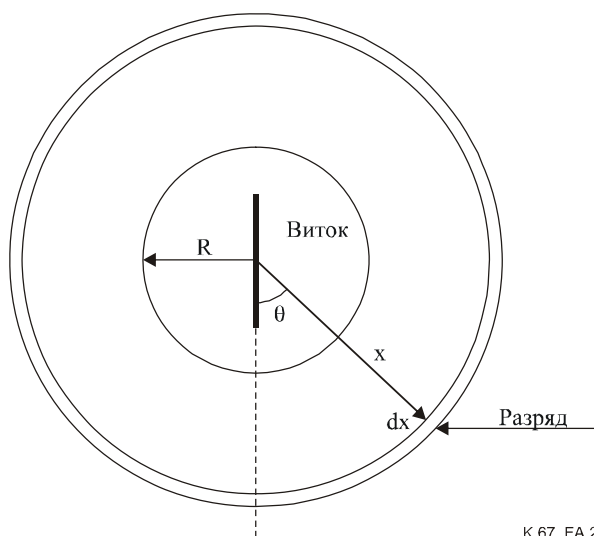
$N_T(U)$  = полное количество разрядов молнии, которые индуцируют напряжение, равное или превосходящее напряжение  $U$ .

Полное количество разрядов молнии  $N_T(U)$  выражается следующим уравнением (см. рисунок А.2):

$$N_T = 4 \cdot N_g \int_R^{\infty} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_I^{\infty} p(i) \cdot di \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot x \cdot dx, \quad (A.4)$$

где:

- $N_g$  = плотность разрядов молнии на единицу поверхности земли (разряды/км<sup>2</sup> · год);  
 $R$  = минимальное расстояние от витка, при котором разряд молнии не совершает прямого попадания в сооружение ( $R \cong 3H + L/2$ ) (см. рисунок А.1);  
 $p(i)$  = функция распределения вероятности для тока разряда молнии.  
 ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Как показано в Рекомендации МСЭ-Т К.47,  $p(i) = 10^{-2} e^{(a-bi)}$  для  $i \geq 0$ , где "i" – пиковое значение тока разряда молнии [кА],  $a = 4,605$  и  $b = 0,0117$  для  $i \leq 20$  кА,  $a = 5,063$  и  $b = 0,0346$  для  $i > 20$  кА.  
 $\theta$  = угол между витком и прямой линией, которая соединяет виток и разряд молнии;  
 $x$  = расстояние между разрядом молнии и центром витка;  
 $I_p$  = пиковое значение тока молнии, который индуцирует в витке напряжение  $U$ , значение которого выражается уравнением (4).



**Рисунок А.2/К.67 – Исходная конфигурация, которая используется для оценки выбросов, индуцируемых в витке разрядом молнии, произошедшим поблизости от сооружения**

Предполагая, что большинство из ударов молнии происходит на некотором расстоянии от сооружения, так что  $f+d \gg e$  и, следовательно,  $\ln [(f+d+e)/(f+d)] \cong e / (f+d)$ , то уравнение (А.1) может быть записано в следующем виде:

$$L_M = 0,2 \times \eta \times K_s \times h \times \frac{e}{(f+d)} \cong \frac{W}{x} \quad (\text{А.5})$$

Здесь  $x \cong f+d$ , а  $W$  – это константа, выражаемая с помощью следующего уравнения:

$$W = 0,2 \times \eta \times K_s \times h \times e \quad (\text{А.6})$$

Вычисляя интеграл в уравнении (А.4) и подставляя полученный результат в уравнение (А.3), после серии алгебраических упрощений мы получаем следующие уравнения:

$$SPL = \left( \frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_1 \cdot U_{SPL} + 1) \exp(a_1 - C_1 \cdot U_{SPL}) - D]}{[(C_1 \cdot U_R + 1) \exp(a_1 - C_1 \cdot U_R) - D]} \quad \text{для } U_R \text{ и } U_{SPL} \leq U_{LIM} \quad (\text{А.7})$$

$$SPL = \left( \frac{b_1 \cdot U_R}{b_2 \cdot U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_2 \cdot U_{SPL} + 1) \exp(a_2 - C_2 \cdot U_{SPL})]}{[(C_1 \cdot U_R + 1) \exp(a_1 - C_1 \cdot U_R) - D]} \quad \text{для } U_R \leq U_{LIM} \text{ и } U_{SPL} > U_{LIM} \quad (\text{А.8})$$

$$SPL = \left( \frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \frac{[(C_2 \cdot U_{SPL} + 1) \exp(a_2 - C_2 \cdot U_{SPL})]}{[(C_2 \cdot U_R + 1) \exp(a_2 - C_2 \cdot U_R)]} \quad \text{для } U_R \text{ и } U_{SPL} > U_{LIM} \quad (A.9)$$

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Использование трех уравнений (A.7), (A.8) и (A.9) вместо одного объясняется разрывом в функции  $p(i)$  при  $i = 20$  кА (см. ПРИМЕЧАНИЕ 1);

где:

$$U_{LIM} = \frac{20 \cdot W}{R \cdot T_1} \quad (A.10)$$

$$C_1 = \frac{b_1 \cdot R \cdot T_1}{W} \quad (A.11)$$

$$C_2 = \frac{b_2 \cdot R \cdot T_1}{W} \quad (A.12)$$

$$D = \left( 1 + 20b_1 - 20 \frac{b_1^2}{b_2} - \frac{b_1^2}{b_2^2} \right) \exp(a_1 - 20b_1) = 82,33 \quad (A.13)$$

$a_1 = 4,605$ ;  $b_1 = 0,0117$ ;  $a_2 = 5,063$ ; и  $b_2 = 0,0346$  являются параметрами функции  $p(i)$ .

В уравнениях (A.7) - (A.9) значения  $U_{SPL}$  и  $U_R$  выражаются в кВ.

Предельное условие для SPL достигается при  $R \rightarrow 0$ . В этом случае уравнения (A.7) – (A.9) принимают более простой вид, показанный формулой (A.14), где  $U_{SPL}$  не зависит от размеров витка и от параметров  $p(i)$ .

$$SPL = \left( \frac{U_R}{U_{SPL}} \right)^2 \quad (A.14)$$

В Таблицах A.1 и A.2 показаны значения  $U_{SPL}$  для различных значений SPL,  $U_R$ , размеров витка и сооружения, все вычисления производятся на основании уравнений (A.7) – (A.9).

Тот же подход может использоваться для того, чтобы индуцировать ток в короткозамкнутом витке. Полученные в результате уравнения подобны уравнениям (A.7) – (A.9), в которых напряжения  $U_R$ ,  $U_{SPL}$  и  $U_{LIM}$  заменены на токи  $I_R$ ,  $I_{SPL}$  и  $I_{LIM}$ . Выражения (A.10) – (A.12) в результате принимают следующий вид:

$$I_{LIM} = \frac{20 \times W}{R \times L_S} \quad (A.15)$$

$$C_1 = \frac{b_1 \times R \times L_S}{W} \quad (A.16)$$

$$C_2 = \frac{b_2 \times R \times L_S}{W} \quad (A.17)$$

При проведении вычисления для данных, показанных в таблицах A.1 и A.2, предполагалось, что функция  $p(i)$  применяется к первому удару молнии. Как показано в таблице 1, последующие удары имеют такое же распределение, как и первый, однако их токи имеют значение в 4 раза меньшее (например, если ток для первого удара равен 200 кА, то для следующего и всех следующих затем ударов значение тока будет равно 50 кА). Таким образом, так как функция  $p(i)$  использовалась в вычислениях с помощью формул (A.7) – (A.9), то длительность фронта для последующих разрядов, которая используется при вычислении  $U_{SPL}$ , умножается на коэффициент 4 с целью компенсировать различия в значениях токов, т. е.  $T_1 = 1$  мкс. Значения  $U_{SPL}$  и  $I_{SPL}$  вычислялись для последующих и для первого удара, соответственно.

**Таблица А.1/К.67 – Пиковые значения выбросов напряжения и тока, индуцируемых в витке площадью 25 м<sup>2</sup>, расположенного внутри сооружения, под влиянием разряда молнии, произошедшего поблизости от сооружения**

| Уровень SPL | Размеры сооружения (м)              |                      |                                      |                      |                               |                      |
|-------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|
|             | L = 25 – H = 50<br>(большое здание) |                      | L = 15 – H = 5<br>(маленькое здание) |                      | L = 0 – H = 0<br>(здания нет) |                      |
|             | U <sub>SPL</sub> (В)                | I <sub>SPL</sub> (А) | U <sub>SPL</sub> (В)                 | I <sub>SPL</sub> (А) | U <sub>SPL</sub> (В)          | I <sub>SPL</sub> (А) |
| I           | 2 520                               | 61                   | 4 630                                | 112                  | 5 000                         | 121                  |
| II          | 2 100                               | 51                   | 3 390                                | 82                   | 3 540                         | 86                   |
| III/IV      | 1 610                               | 39                   | 2 200                                | 53                   | 2 240                         | 54                   |

ПРИМЕЧАНИЕ. – Условия, при которых проводились вычисления: h = 2,5 м; e = 10 м; r = 0,5 мм (L<sub>s</sub> = 41,2 мкГн); η = 1; K<sub>s</sub> = 1.

**Таблица А.2/К.67 – Пиковые значения выбросов напряжения и тока, индуцируемых в витке площадью 50 м<sup>2</sup>, расположенного внутри сооружения, под влиянием разряда молнии, произошедшего поблизости от сооружения**

| Уровень SPL | Размеры сооружения (м)              |                      |                                      |                      |                               |                      |
|-------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|
|             | L = 25 – H = 50<br>(большое здание) |                      | L = 15 – H = 5<br>(маленькое здание) |                      | L = 0 – H = 0<br>(здания нет) |                      |
|             | U <sub>SPL</sub> (В)                | I <sub>SPL</sub> (А) | U <sub>SPL</sub> (В)                 | I <sub>SPL</sub> (А) | U <sub>SPL</sub> (В)          | I <sub>SPL</sub> (А) |
| I           | 3 370                               | 64                   | 4 890                                | 93                   | 5 000                         | 95                   |
| II          | 2 690                               | 51                   | 3 500                                | 67                   | 3 540                         | 68                   |
| III/IV      | 1 920                               | 37                   | 2 230                                | 43                   | 2 240                         | 43                   |

ПРИМЕЧАНИЕ. – Условия, при которых проводились вычисления: h = 5 м; e = 10 м; r = 0,5 мм (L<sub>s</sub> = 52,4 мкГн); η = 1; K<sub>s</sub> = 1.

Значения индуктивности L<sub>s</sub> для витков с различными размерами могут быть вычислены с помощью уравнения (А.2). В таблице А.3 показаны некоторые результаты, полученные с помощью уравнения (А.2) для витков с различными размерами.

**Таблица А.3/К.67 – Выраженные в мкГн значения индуктивности (L<sub>s</sub>) для витков с различными размерами**

| h (м) | e = 20 м   |          | e = 10 м   |          |
|-------|------------|----------|------------|----------|
|       | r = 0,5 мм | r = 5 мм | r = 0,5 мм | r = 5 мм |
| 2,5   | 75,3       | 54,6     | 41,2       | 29,7     |
| 0,5   | 56,4       | 37,5     | 28,7       | 19,1     |
| 0,05  | 36,9       | 18,4     | 18,5       | 9,2      |
| 0,025 | 31,3       | 12,9     | 15,7       | 6,4      |

### А.3 Непосредственный удар молнии в сооружение

В случае непосредственного удара молнии в сооружение необходимо рассмотреть следующие три варианта:

- 1) сооружение защищается с помощью устройства молниезащиты (LPS), установленного на отдельном стержне (например, антенная мачта, которая защищает расположенную рядом базовую радиостанцию сотовой связи (Radio Base Station, RBS));
- 2) сооружение защищается с помощью устройства молниезащиты (LPS), выполненного в виде сетки, в которой проводники располагаются по периметру;
- 3) сооружение защищается пространственным экраном в виде решетки (LPS), при этом ширина элементов сетки  $w \leq 5$  м.

В первых двух случаях напряжение ( $V_{i0}$ ), которое индуцируется в разомкнутом витке, расположенном внутри сооружения, может быть оценено с помощью уравнения (4), где взаимная индуктивность  $L_M$  выражается с помощью следующего уравнения [4, 6]:

$$L_M = 0,2 \times K_c \times K_s \times h \times \ln\left(\frac{d+e}{d}\right) [\text{мкГн}] \quad (\text{A.18})$$

где (см. рисунок А.3):

$h$  = высота витка [м];

$e$  = длина витка [м];

$d$  = расстояние между идущими вниз проводниками и витком схемы [м];

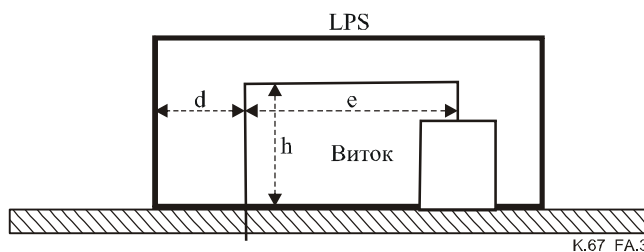
$K_c$  = коэффициент, который учитывает распределение тока между идущими вниз проводниками;

$K_s$  = коэффициент экранирования, который учитывает эффект экранирования, который обеспечивается экраном кабеля;

и:

$I_{ps}$  = пиковое значение последующих разрядов (таблица 1) [кА];

$T_1 = 0,25$  = длительность нарастания фронта для последующих разрядов (таблица 1) [мкс].



**Рисунок А.3/К.67 – Разряд молнии ударяет в сооружение: устройство молниезащиты с идущими вниз одним или несколькими проводниками**

Если устройство молниезащиты (LPS) имеет только один идущий вниз проводник, то  $K_c$  принимается равным 1; в том случае, если LPS имеет несколько идущих вниз проводников, то [6]:

$$K_c = \frac{1}{2 \times n} + 0,3, \quad (\text{A.19})$$

где:

$n$  = количество идущих вниз проводников, которые располагаются по периметру на равном расстоянии друг от друга.

В третьем случае, когда сооружение защищено устройством молниезащиты в виде пространственного экрана, выполненного в виде сетки, пиковое значение напряжения, которое индуцируется в разомкнутом витке, может быть вычислено с помощью уравнения (4), при этом взаимная индуктивность  $L_M$  выражается с помощью следующего уравнения [6]:

$$L_M = 0,4 \times \pi \times K_s \times h \times \ln\left(\frac{d_w + e}{d_w}\right) \times K_h \times \frac{w}{\sqrt{d_r}} [\text{мкГн}], \quad (\text{A.20})$$

где (см. рисунок А.4):

$d_w$  = расстояние витка от стены [м];

$d_r$  = расстояние витка от крыши [м];

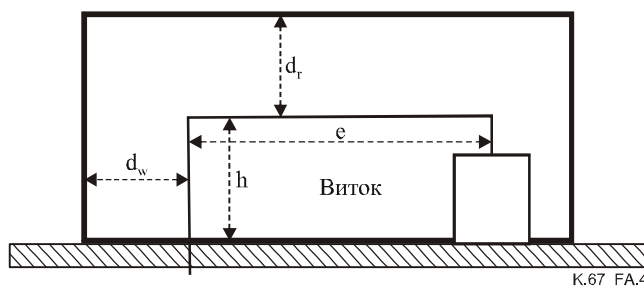
$K_h$  = конфигурационный фактор, равный  $0,01[1/\text{м}^{0,5}]$ ;

$K_s$  = коэффициент экранирования, который учитывает эффект экранирования экрана кабеля;



и:

$I_{ps}$  = пиковое значение для последующих разрядов (таблица 1) [кА];  
 $T_1 = 0,25$  = длительность фронта для последующих разрядов (таблица 1) [мкс].



**Рисунок А.4/К.67 – Разряд молнии ударяет в сооружение: устройство молниезащиты (LPS) с пространственным экраном, выполненным в виде сетки**

Если мы рассматриваем наиболее неблагоприятный случай и пренебрегаем омическим сопротивлением проводов, то получаем ток короткого замыкания ( $I_{sc}$ ), значение которого может быть получено с помощью уравнений (5) или (6), где собственная индуктивность ( $L_S$ ) (измеряется в Генри) для витка вычисляется с помощью уравнения (А.2).

Значения  $V_{oi}$  и  $I_{sc}$ , относящиеся к первому и последующим разрядам, приводятся в таблице А.4 в качестве функции от уровня молниезащиты (LPL). При этом предполагается, что сооружение защищено с помощью устройства молниезащиты (LPS), установленного на отдельном стержне ( $K_c = 1$ , наименее благоприятный вариант), внутренние кабели являются неэкранированными и размер индуктивного витка составляет  $50 \text{ м}^2$  ( $h = 5 \text{ м}$ ;  $e = 10 \text{ м}$ ).

**Таблица А.4/К.67 – Пиковые значения индуцированных выбросов для витка площадью  $50 \text{ м}^2$ , расположенного внутри сооружения, под влиянием прямого удара молнии в сооружение**

| Уровень молниезащиты (LPL) | Первый разряд |               | Последующие разряды |               |
|----------------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|
|                            | $V_{oi}$ [кВ] | $I_{sc}$ [кА] | $V_{oi}$ [кВ]       | $I_{sc}$ [кА] |
| I                          | 25            | 6             | 250                 | 1,5           |
| II                         | 19            | 4,5           | 190                 | 1,2           |
| III/IV                     | 12,5          | 3             | 125                 | 0,8           |

ПРИМЕЧАНИЕ. – Условия, при которых проводились вычисления:  $L_S = 42 \text{ мкГн}$ ;  $L_M = 0,792 \text{ мкГн}$ ; размер витка  $50 \text{ м}^2$  ( $h = 5 \text{ м}$ ;  $e = 10 \text{ м}$ );  $K_c = 1$ ;  $K_s = 1$ ;  $d = 4 \text{ м}$ ;  $r = 0,5 \text{ м}$ .

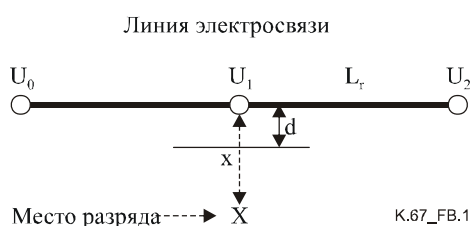
## Приложение В

### Выбросы, индуцированные в линиях электросвязи под влиянием разряда молнии, произошедшего поблизости от этой линии: земля – идеальный проводник

Количество разрядов молнии для элементарной секции " $L_r \times dx$ ", при которых в линии электросвязи индуцируется напряжение равное или большее чем  $U$ , выражается следующей формулой:

$$N = 2 \times L_r \times N_g \times dx \int_I^{\infty} p(i) \times di, \quad (B.1)$$

где  $N_g$  – плотность ударов молнии в землю,  $L_r$  – длина линии,  $p(i)$  – функция (распределения) вероятности тока молнии согласно Рекомендациям МСЭ-Т К.25, К.47 и МЭК 61663-1, а  $I$  – пиковое значение тока молнии, которое создает напряжение  $U$  в заданной точке линии.



**Рисунок В.1/К.67 – Исходная конфигурация для оценки выброса, индуцируемого разрядом молнии в окрестности линии**

Полное количество разрядов, которые индуцируют напряжение, равное или большее, чем  $U$ , выражается следующей формулой:

$$N_T = 2 \times L_r \times N_g \int_d^{\infty} \int_I^{\infty} p(i) \cdot di \cdot dx \quad (B.2)$$

Здесь  $d$  – минимальное расстояние от линии, при котором не происходит непосредственного удара молнии в линию. Здесь используется приближенное соотношение  $d = 3 h$  (рисунок В.1).

Пиковое значение напряжения  $U_1$ , относящегося к средней точке линии, а также напряжений  $U_0$  или  $U_2$ , относящихся к концам линии, могут быть оценены с помощью следующего выражения, при этом предполагается, что земля (почва) является идеальным проводником:

$$U_1 = \frac{30 \times I_p \times h}{d} \left( 1 + \frac{v}{\sqrt{2 - v^2}} \right) \quad (B.3)$$

$$U_0 = U_2 = \frac{30 \times I_p \times h}{d}, \quad (B.4)$$

где:

$I_p$  = пиковое значение тока молнии (в кА);

$v$  = отношение скорости обратного удара (предполагается равной  $v = 1,3 \times 10^8$  м/с) и скорости света ( $c = 3 \times 10^8$  м/с):

$$v = 0,43 \text{ и } \left( 1 + \frac{v}{\sqrt{2 - v^2}} \right) = 1,3.$$

Подставляя значение  $I_p$  из уравнения (В.4) в уравнение (В.2), вычисляя интегралы, а затем подставляя полученные результаты в уравнение (15), после некоторых алгебраических преобразований мы получаем следующие уравнения:

$$SPL = \frac{U_R [\exp(a_1 - A_1 U_0) - B]}{U_{SPL} [\exp(a_1 - A_1 U_R) - B]}, \text{ где } U_R \text{ и } U_0 \leq U_{LIM} \quad (\text{В.5})$$

$$SPL = \frac{b_1 U_R [\exp(a_2 - A_2 U_0)]}{b_2 U_{SPL} [\exp(a_1 - A_1 U_R) - B]}, \text{ где } U_0 > U_{LIM} \text{ и } U_R \leq U_{LIM} \quad (\text{В.6})$$

$$SPL = \frac{U_R [\exp(a_2 - A_2 U_0)]}{U_{SPL} [\exp(a_2 - A_2 U_R)]}, \text{ где } U_0 > U_{LIM} \text{ и } U_R > U_{LIM} \quad (\text{В.7})$$

ПРИМЕЧАНИЕ 1. – Использование трех уравнений (В.5), (В.6) и (В.7) вместо одного объясняется разрывом в функции  $p(i)$  при  $i = 20$  кА;

где:

$\eta$  = это коэффициент экранирования линии (для неэкранированной линии  $\eta = 1$ )

$$U_{LIM} = 600 h \eta / d \quad (\text{В.8})$$

$$A_1 = \frac{b_1}{10\eta} = \frac{0,00117}{\eta} \quad (\text{В.9})$$

$$A_2 = \frac{b_2}{10\eta} = \frac{0,00346}{\eta} \quad (\text{В.10})$$

$$B = \left(1 - \frac{b_1}{b_2}\right) \exp(a_1 - 20b_1) = 52,37 \quad (\text{В.11})$$

$a_1 = 4,605$ ;  $b_1 = 0,0117$ ;  $a_2 = 5,063$ ; и  $b_2 = 0,0346$  являются параметрами  $p(i)$ .

В уравнениях (В.5) – (В.7) значения  $U_{SPL}$  и  $U_R$  выражаются в кВ.

Предельное условие для SPL достигается при  $d \rightarrow 0$ . В этом случае уравнения (В.5) – (В.7) принимают более простой вид, показанный формулой (В.12), где  $U_{SPL}$  не зависит от характеристик линии и от параметров функции  $p(i)$ .

$$SPL = \left( \frac{U_R}{U_{SPL}} \right) \quad (\text{В.12})$$

В таблице В.1 показаны значения  $U_{SPL}$  для различных значений уровня защиты от выбросов (SPL) и  $U_R$ , полученные с помощью уравнения (В.5) для воздушной неэкранированной линии ( $\eta = 1$ ).

**Таблица В.1/К.67 – Значения опасного напряжения выброса ( $U_{SPL}$ ) для разомкнутой схемы на концах воздушной неэкранированной линии как функция уровня защиты от выбросов (SPL) для различных значений опорного напряжения  $U_R$**

| $U_R$ (кВ) | Опасное напряжение выброса, $U_{SPL}$ [кВ] |      |      |
|------------|--|------|------|
|            | SPL  |      |      |
|            | 0,01                                       | 0,02 | 0,05 |
| 1,5        | 111  | 64   | 28   |
| 1,0        | 81   | 44   | 19   |
| 0,75       | 64   | 34   | 14   |
| 0,5        | 44   | 23   | 10   |
| 0,25       | 23   | 12   | 5    |

В таблице В.1 в качестве нижнего предела для "опасного" значения напряжения для разомкнутой цепи принималось удвоенное значение опорного напряжения ( $2 \times U_R$ ), что позволяет учесть отражение от окончаний линии. Например, если  $U_R = 0,75$  кВ и  $SPL = 0,01$ , то это означает, что 1% индуцированного в открытой цепи напряжений с уровнем более 1,5 кВ будет иметь значение, равное или превышающее 64 кВ.

Пиковое значение тока короткого замыкания ( $I_{sc}$ ) оценивается следующим образом:

$$I_{sc} = \frac{U_{SPL}}{Z}, \quad (B.13)$$

где:

$Z = 400$  Ом – импеданс выброса для воздушной линии.

Для экранированной воздушной линии значения  $U_{SPL}$  могут быть рассчитаны с помощью той же процедуры, которая была описана выше и в которой оценивался коэффициент экранирования для экрана, затем он использовался в уравнениях (B.9) и (B.10). Тем не менее полученное в результате значение  $U_{SPL}$  будет иметь абсолютную вероятность возникновения (количество разрядов за год), которая намного ниже соответствующего значения  $U_{SPL}$  для неэкранированной линии. Следовательно, для того чтобы получить значение  $U_{SPL}$  для экранированной линии, целесообразно умножать  $U_{SPL}$  для неэкранированной линии на коэффициент экранирования.

ПРИМЕЧАНИЕ 2. – Например, если рассматривать уровень защиты от выбросов SPL II, то это означает, что среди всех напряжений с уровнем выше 0,75 кВ, которые наблюдались на неэкранированном кабеле на протяжении определенного периода времени, 2% равнялись или превышали уровень 34 кВ, а также то, что эти 2% соответствуют количеству разрядов молнии, равному  $N_T$ . Следовательно, для экранированной линии ( $\eta_e = 0,1$ ) с тем же уровнем защиты от выбросов SPL II за этот же период времени будет зафиксировано  $N_T$  разрядов молнии с уровнем, равным или превышающим 3,4 кВ. Однако необходимо заметить, что среди всех напряжений с уровнем выше 0,75 кВ, которые наблюдались за данный период времени на экранированной линии, более чем 2% имели уровень, равный или превышающий 3,4 кВ.

Результирующие значения для специальных коэффициентов экранирования представлены в таблице 5, в частности, представлен коэффициент экранирования, относящийся к экрану, ( $\eta_s = 0,05$ ) для узлов L, E, P и C и относящийся к земле коэффициент экранирования ( $\eta_e = 0,1$ ) для узлов D, S и I.

ПРИМЕЧАНИЕ 3. – Коэффициент экранирования для экрана оценивался в предположении, что сопротивление экрана ( $R_s$ ) равно 5 Ом, тогда  $\eta_s = R_s/Z = 5/100 = 0,05$ . Коэффициент экранирования, относящийся к земле, оценивался в предположении, что сопротивление земли экрана  $R_e$  равно приблизительно 40 Ом, тогда  $\eta_e = (R_s + R_e)/(Z + R_e) = 45/440 = 0,1$ .

В таблице В.2 показаны значения  $U_{SPL}$  для различных значений SPL и  $U_R$  для воздушных экранированных линий ( $\eta = 0,1$ ) с учетом описанных ранее соображений.

**Таблица В.2/К.67 – Опасные значения выбросов напряжения для разомкнутой цепи ( $U_{SPL}$ ) для концов воздушной экранированной линии в виде функции уровня защиты от выбросов (SPL) для различных значений опорного напряжения  $U_R$**

| $U_R$ (кВ) | Опасный уровень напряжения выброса,<br>$U_{SPL}$ [кВ] |      |      |
|------------|---|------|------|
|            | SPL   |      |      |
|            | 0,01  | 0,02 | 0,05 |
| 1,5        | 11  | 6,4  | 2,8  |
| 1,0        | 8,1   | 4,4  | 1,9  |
| 0,75       | 6,4   | 3,4  | 1,4  |
| 0,5        | 4,4   | 2,3  | 1,0  |
| 0,25       | 2,3   | 1,2  | 0,5  |

Пиковое значение тока для короткозамкнутой схемы ( $I_{sc}$ ) может быть оценено с помощью уравнения (B.13), где  $Z$  равняется 50 Ом или 100 Ом и представляет собой импеданс выброса соответственно для цепи проводник-экран и проводник-земля, которые были получены эмпирическим путем на основании выполненных измерений.

## Дополнение I

### Выбросы, индуцированные внутри сооружения, под влиянием разряда молнии, произошедшим поблизости или непосредственно в данное сооружение: схема и результаты экспериментов

#### I.1 Введение

Задачей данного приложения является поддержка допущения о том, что индуцируемое разрядом молнии в разомкнутой схеме напряжение отличается чрезвычайно короткой длительностью фронта и имеет чрезвычайно короткую продолжительность, в то время как форма индуцируемого в замкнутой схеме тока идентична форме тока разряда молнии. Для этого используются экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний в Качоэйра Паулиста (Cachoeira Paulista), Бразилия.

#### I.2 Теоретическая модель

При этом предполагается следующее:

- Виток располагается на сравнительно небольшом расстоянии от канала разряда молнии, таким образом, мы можем рассматривать ток разряда как однородный на всем протяжении канала (это предположение позволяет отказаться от рассмотрения особенностей распространения тока молнии по каналу разряда молнии).
- Земля рассматривается в качестве идеального проводника, благодаря этому для канала разряда молнии ниже поверхности земли может использоваться теория отражения.
- Пренебрегаем влиянием металлических проводников (например, линий электропередач), которые могут нести часть тока разряда молнии. Это означает, что мы рассматриваем симметричное распределение тока на поверхности земли, что разрешает использование теории отражения.
- Считается, что сопротивление витка мало по сравнению с его индуктивным реактивным сопротивлением для той полосы частот, которая соответствует току разряда молнии (что действительно для большинства представляющих практический интерес случаев).
- Пренебрегаем любыми эффектами экранирования вокруг витка.
- Пренебрегаем любыми отклонениями канала разряда молнии от вертикального направления.
- Предполагаем, что виток и канал молнии лежат в одной плоскости (это достаточно осторожное допущение, которое влияет на амплитуду тока, но никак не влияет на форму импульса).

Таким образом, индуктирующий ток разряда молнии ( $I_a$ ) однородно течет вдоль прямой вертикальной линии (см. рисунок I.1). Поле магнитной индукции ( $B$ ), которое создается этим током, выражается следующей формулой:

$$B = \frac{\mu_0 \times I_a}{2 \times \pi \times x}, \quad (I.1)$$

где:

$x$  – расстояние от канала разряда молнии.

Магнитный поток, который протекает через виток, легко вычисляется с помощью интегрирования магнитного поля по поверхности витка.

$$\Phi_B = \frac{I_a \times h \times \mu_0}{2 \times \pi} \int_f^{f+e} \frac{dx}{x}, \quad (I.2)$$

что приводит к:

$$\Phi_B = \frac{I_a \times h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} \quad (I.3)$$

Напряжение возбуждения ( $V$ ), индуцируемое в витке, выражается как производная по времени от магнитного потока:

$$V = \frac{\left(\frac{dI_a}{dt}\right) \times h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} \quad (I.4)$$

Уравнение (I.4) может быть записано следующим образом:

$$V = L_M \times \left(\frac{dI_a}{dt}\right), \quad (I.5)$$

где:

$L_M$  – взаимная индуктивность между витком и каналом разряда молнии, то есть:

$$L_M = \frac{h \times \mu_0 \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right)}{2 \times \pi} = 0,2 \times h \times \ln\left(\frac{f+e}{f}\right) \text{ в мкГн} \quad (I.6)$$

Индуцируемый ток  $I_{loop}$  выражается следующим образом:

$$I_{loop} = \left(\frac{1}{L_S}\right) \int V dt = \left(\frac{L_M}{L_S}\right) \times I_a, \quad (I.7)$$

где:

$L_S$  – собственная индуктивность витка.

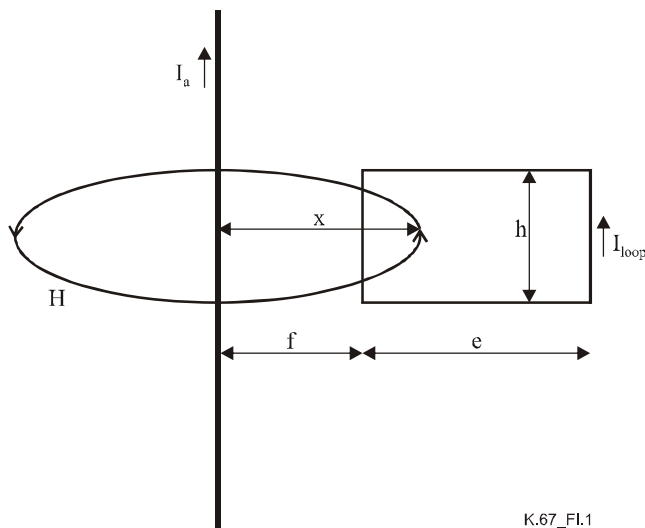


Рисунок I.1/К.67 – Индукция для витка

### I.3 Место проведения и схема экспериментов

#### I.3.1 Место проведения экспериментов

На рисунке I.2a показана базовая радиостанция, где в нижней части башни располагается площадка для запуска ракеты, которая используется для эмуляции разряда молнии. На рисунке I.2b показан вид вершины башни с более близкого расстояния. Площадка установлена на изоляторах и соединяется с сооружением с помощью единственного проводника. Этот проводник проходит через токовый монитор Пирсона (Pearson current monitor, type 1330), сигнал с которого поступает на осциллограф, расположенный поблизости в металлической коробке. Удаленное управление осциллографом осуществляется с помощью интерфейса RS-232 и оптоволоконной линии передачи данных. Это обеспечивает возможность непосредственного измерения тока молнии.



а) Базовая радиостанция на месте проведения экспериментов

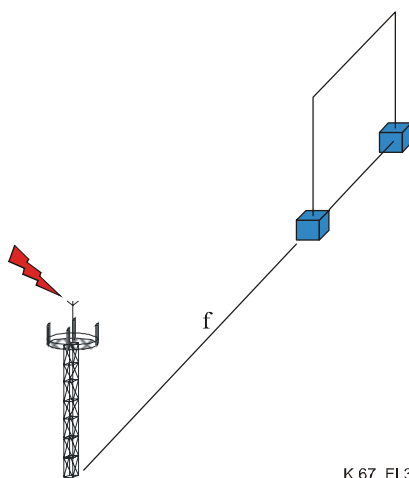
б) Вершина башни

**Рисунок I.2/К.67 – Базовая радиостанция на месте проведения экспериментов**

#### I.3.2 Проведение экспериментов для напряжения, индуцируемого в разомкнутом витке

Схема экспериментальной установки показана на рисунке I.3, здесь молния создается и регистрируется на вершине башни электросвязи, а индуцированное напряжение измеряется в витке, размещенном на расстоянии  $f$  от башни. Характеристики экспериментальной установки:

- Размеры витка:  $e = 1,5$  м и  $h = 2,0$  м (площадь витка =  $3$  м<sup>2</sup>);
- Расстояние между витком и разрядом молнии,  $f = 100$  м.

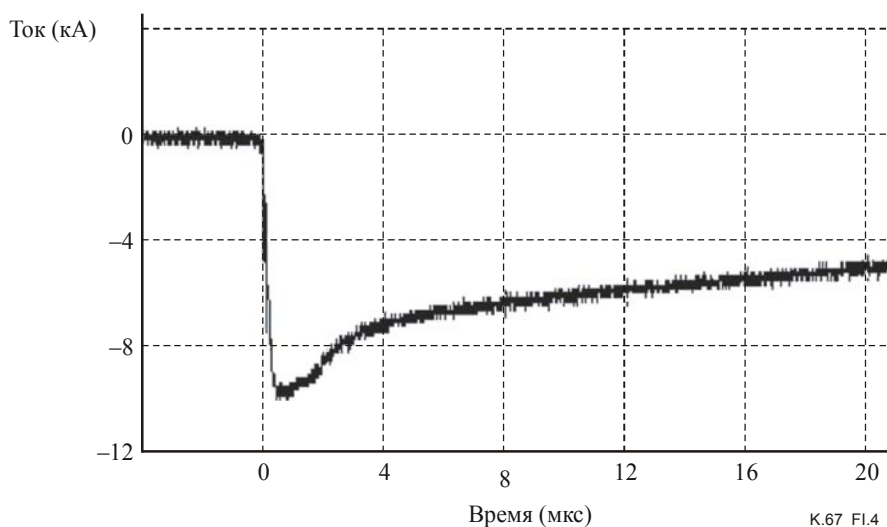


K.67\_FL3

**Рисунок I.3/К.67 – Экспериментальная установка для напряжения, индуцируемого в разомкнутом витке**

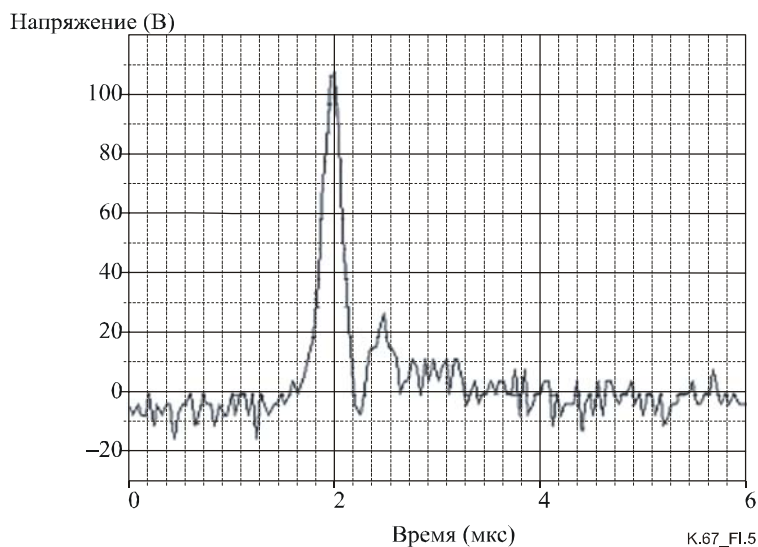
Измеренный ток разряда молнии показан на рисунке I.4, и его основные параметры представлены ниже:

- ток: длительность фронта ( $T$ ) = 0,375 мс;
- пиковое значение ( $I_s$ ) = 9,8 кА.



**Рисунок I.4/К.67 – Созданный ток молнии**

Измеренные значения индуцированного в витке напряжения показаны на рисунке I.5, откуда можно увидеть, что длительность фронта индуцируемого в разомкнутом витке напряжения подобна аналогичной характеристике для индуцируемого тока (т. е. составляет 0,35 мкс). Кроме этого, форма сигнала занимает чрезвычайно короткий промежуток времени – порядка нескольких микросекунд.



(время не синхронизовано с рисунком I.4)

**Рисунок I.5/К.67 – Измеренные значения индуцированного в витке напряжения**

Подставляя численные значения в уравнение (I.4) и предполагая, что ток имеет форму трапеции, мы получаем прямоугольную волну продолжительностью 0,375 мкс, пиковое значение для которой составляет 157 В. Это значение следует сравнить с рисунком I.5, из которого мы видим, что оно немного превышает измеренное значение, равное 110 В.



Можно использовать более развитый метод, который основывается на работе Руска (Rusck) [I.1]. Данная модель учитывает распространение тока по каналу разряда молнии. Рассматривая уравнение Руска для магнитной индукции ( $B$ ) поля, индуцируемого на некотором расстоянии от места разряда, то после вычисления производной по времени мы получаем:

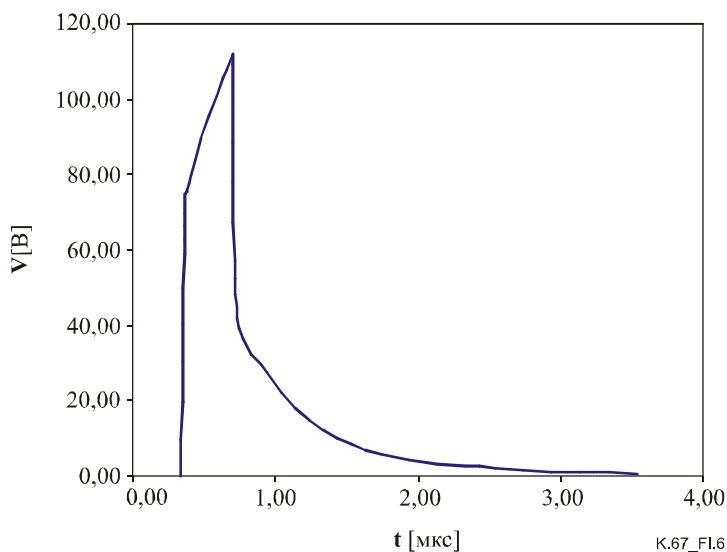
$$\frac{dB}{dt} = 0 \text{ для } t \leq r_0/v_0 \quad (I.8)$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{60I_0v}{r_0^2Tv_0} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \left[ \left( \frac{v_0t}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} t \right\} \text{ для } r_0/v_0 \leq t \leq r_0/v_0 + T \quad (I.9)$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{60I_0v}{r_0^2Tv_0} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \left[ \left( \frac{v_0t}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} t - \left[ 1 + \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \left[ \left( \frac{v_0(t-T)}{r_0} \right)^2 - 1 \right] \right]^{-1/2} (t-T) \right\} \quad (I.10)$$

для  $t \geq r_0/v_0 + T$

В уравнениях (I.9) и (I.10)  $v_0$  представляет собой скорость света в свободном пространстве (вакууме), равную  $3 \times 10^8$  м/с, а  $v$  – это скорость распространения тока молнии, которая предполагается равной  $1,3 \times 10^8$  м/с. Подставляя в эти уравнения численные значения, мы получаем форму сигнала, показанную на рисунке А.6. Пиковое значение здесь составляет 112 В, что превосходно согласуется с измеренным значением напряжения.

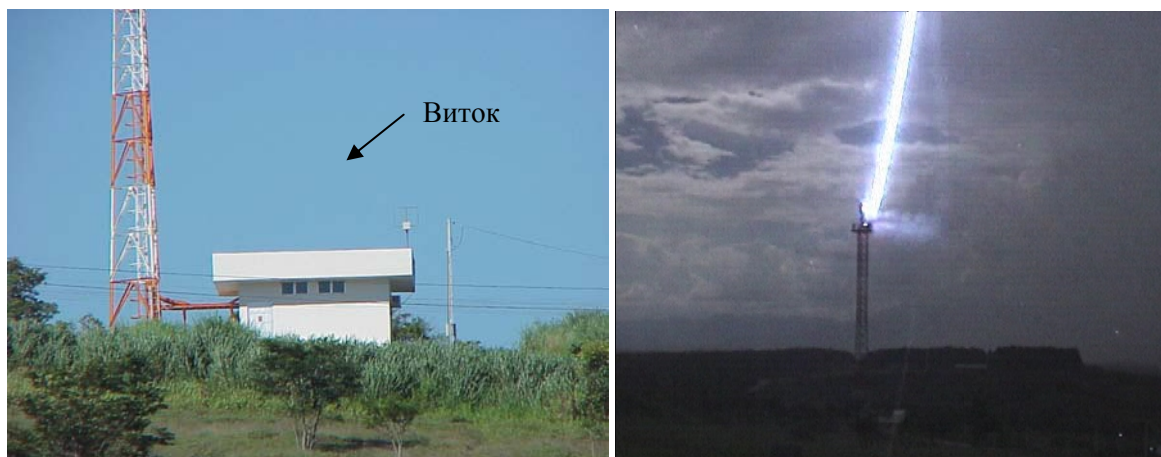


**Рисунок I.6/К.67 – Волна напряжения, рассчитанная на основе модели Руска**

Рассматривая уравнения (I.9) и (I.10), мы можем заключить, что если виток располагается достаточно близко к месту удара молнии ( $f < T v_0$ ), то пиковое значение индуцированного напряжения вполне может быть приближенно представлено исходя из предположения, что ток разряда молнии остается однородным на всем протяжении канала разряда молнии, как это определяется уравнением (I.4). Однако по мере удаления витка от места разряда индуцируемое напряжение становится все меньше по сравнению со значением, вычисленным по Формуле (I.4), так как важную роль начинает играть скорость распространения тока. В этом случае необходимо использовать уравнения (I.8) – (I.10).

### 1.3.3 Проведение экспериментов для тока, индуцируемого в замкнутом витке

На рисунке I.7a показан вид базовой радиостанции с более близкого расстояния, здесь мы уже можем различить виток, который расположен в верхней части корпуса. Виток изготовлен из замкнутой накоротко медной трубы, значение тока измеряется с помощью токового монитора Пирсона (Pearson current monitor, type 110), сигнал с которого поступает на осциллограф, расположенный внутри корпуса базовой радиостанции. На рисунке I.7b показан созданный разряд молнии, который ударяет в вершину башни, этот разряд наблюдался из защищенного пункта управления.

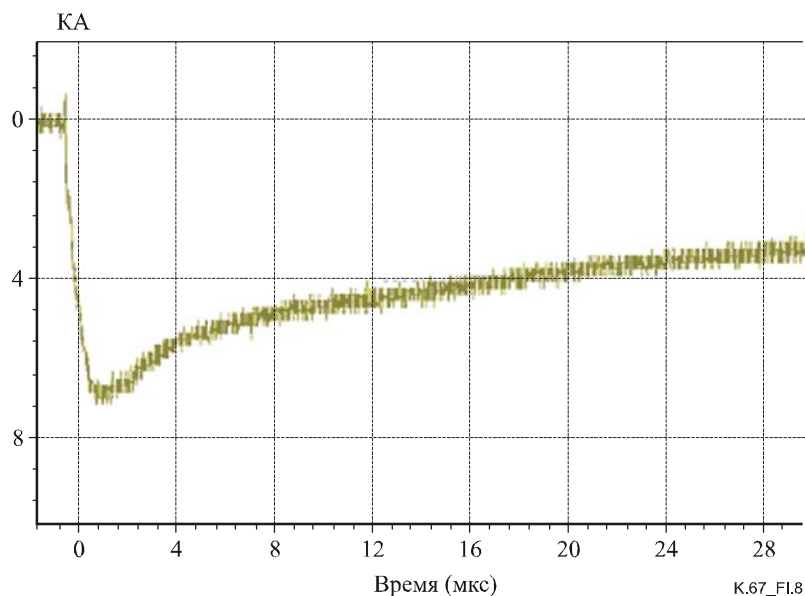


а) Корпус базовой радиостанции вместе с витком

б) Созданный разряд молнии

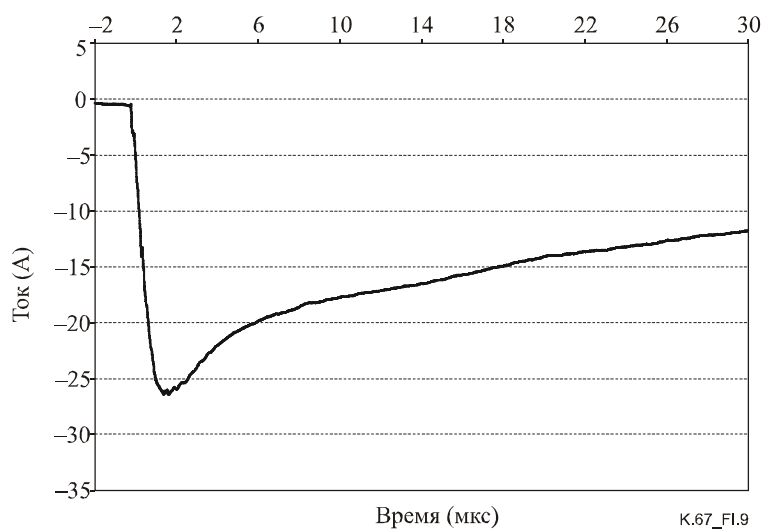
**Рисунок I.7/К.67 – Проведение экспериментов для тока, индуцируемого в замкнутом витке**

Волны, которые одновременно регистрируются на вершине башни (рисунок I.8) и в витке (рисунок I.9), описываются с помощью своего пикового значения, а также с помощью времени уменьшения до половинного значения ( $T_h$ ) и длительности фронта ( $T_f$ ), которая определяется как  $1,25 (T_{90\%} - T_{10\%})$ .



Ток 19/02/2005 – Блок 1 – Вершина башни  
Пиковое значение = 7,4 кА –  $T_h = 24$  мкс –  $T_f = 1,2$  мкс

**Рисунок I.8/К.67 – Ток разряда молнии**



Ток 19/02/2005 – Блок 1 – Виток  
 Пиковое значение = 26,4 А –  $T_h = 24$  мкс –  $T_f = 1,3$  мкс

**Рисунок I.9/К.67 – Ток, индуцируемый в замкнутом витке**

Сравнение форм волн, зарегистрированных на вершине башни и с помощью витка, показывает высокую степень совпадения форм этих двух сигналов.

Параметры, которые характеризуют процесс измерений:

- Расстояние между осью башни и витком:  $f = 10,7$  м;
- Высота витка:  $h = 0,80$  м;
- Ширина витка:  $e = 1,00$  м;
- Радиус проводника, из которого сделан виток =  $0,0075$  м.

Взаимная индуктивность между башней и витком выражается с помощью уравнения (I.6):

$$L_M = 0,0143 \text{ мкГн}$$

Собственная индуктивность витка выражается с помощью уравнения (A.2):

$$L_S = 2,89 \text{ мкГн}$$

Ожидаемое значение текущего по витку тока, согласно уравнению (I.7), при токе разряда молнии  $I_a = 7,04$  кА выражается следующим образом:

$$I_{loop} = 34,8 \text{ А}$$

Измеренный в витке ток (26.4 А) имеет несколько меньшее значение (24%) по сравнению с ожидаемым значением, т. к. действительные условия тестирования не полностью соответствуют тем теоретическим допущениям, которые были предприняты при расчетах и которые перечислены в I.2. К числу подобных допущений, которое вносит наибольший вклад в наблюдаемое различие результатов, относится присутствие линии электропередачи, которая отводит часть тока молнии от станции в таком направлении, что он не оказывает влияния на виток. С целью учесть эти поправки при измерениях тока молнии, данные факторы компенсировались с помощью системного коэффициента, который мог вводиться в измерительное программное обеспечение.

В заключение скажем, что было экспериментально доказано, что форма сигнала тока, который индуцируется под влиянием молнии в замкнутом витке, идентична форме сигнала тока молнии, а соотношение их пиковых значений может быть оценено как соотношение между взаимной и собственной индуктивностью, как это описывается уравнением (I.7).

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [I.1] RUSCK (S.): Transactions of the Royal Institute of Technology, No. 120, *Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks*, Stockholm, 1958.



## СЕРИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ МСЭ-Т

|                |   |
|----------------|---|
| Серия А        | Организация работы МСЭ-Т  |
| Серия D        | Общие принципы тарификации  |
| Серия E        | Общая эксплуатация сети, телефонная служба, функционирование служб и человеческие факторы             |
| Серия F        | Нетелефонные службы электросвязи  |
| Серия G        | Системы и среда передачи, цифровые системы и сети   |
| Серия H        | Аудиовизуальные и мультимедийные системы  |
| Серия I        | Цифровая сеть с интеграцией служб   |
| Серия J        | Кабельные сети и передача сигналов телевизионных и звуковых программ и других мультимедийных сигналов |
| <b>Серия K</b> | <b>Защита от помех</b>  |
| Серия L        | Конструкция, прокладка и защита кабелей и других элементов линейно-кабельных сооружений               |
| Серия M        | Управление электросвязью, включая СУЭ и техническое обслуживание сетей                                |
| Серия N        | Техническое обслуживание: международные каналы передачи звуковых и телевизионных программ             |
| Серия O        | Требования к измерительной аппаратуре   |
| Серия P        | Качество телефонной передачи, телефонные установки, сети местных линий                                |
| Серия Q        | Коммутация и сигнализация   |
| Серия R        | Телеграфная передача  |
| Серия S        | Оконечное оборудование для телеграфных служб  |
| Серия T        | Оконечное оборудование для телематических служб   |
| Серия U        | Телеграфная коммутация  |
| Серия V        | Передача данных по телефонной сети  |
| Серия X        | Сети передачи данных, взаимосвязь открытых систем и безопасность                                      |
| Серия Y        | Глобальная информационная инфраструктура, аспекты межсетевых протоколов и сети последующих поколений  |
| Серия Z        | Языки и общие аспекты программного обеспечения для систем электросвязи                                |