

*Бурибоев Муллахонтура Нурмирза угли, студент 4 курс, факультет*

*«Автоматизации и информатики»*

*Липецкий государственный технический университет, Россия, г. Липецк*

*Ряшницев Владислав Валерьевич, студент 4 курс, факультет*

*«Автоматизации и информатики»*

*Липецкий государственный технический университет, Россия, г. Липецк*

*Зацепина Виолетта Иосифовна, научный руководитель,*

*Липецкий государственный технический университет, Россия, г. Липецк*

## **МОЛНИЕЗАЩИТА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНЕШНИХ ЗАЗАЕМЛЯЮЩИХ ПРОВОДОВ**

**Аннотация:** Статья посвящена анализу нового вида системы молниезащиты воздушных линий электропередачи (ВЛ) на основе внешних заземляющих проводов. Вместо стандартного провода заземления используются два провода заземления, размещенные в верхней части отдельных внешних башен, расположенных по обе стороны защищаемой линии. Этот тип защиты должен применяться в конкретных обстоятельствах для защиты коротких участков (КУ), которые сильно подвержены опасности молнии.

**Ключевые слова:** Молниезащита, воздушные линии электропередач, заземление, энергетика, система защиты, короткое замыкание линии.

**Annotation:** The article is devoted to the analysis of a new type of lightning protection system for overhead power lines (OL) based on external grounding wires. Instead of the standard ground wire, two ground wires are used, placed at the top of separate external towers located on either side of the protected line. This type of protection should be applied in specific circumstances to protect short sections (SS) that are highly exposed to lightning hazards.

**Key words:** Lightning protection, overhead power lines, grounding, power engineering, protection system, short circuit lines.

## **Введение**

Молния является наиболее частой причиной отключения воздушных линий электропередачи (ВЛ) во многих странах. Существуют различные методы снижения скорости отключения КУ, вызванной молнией: установка заземляющих проводов на КУ, снижение импеданса заземления башни, увеличение (БИЛМ) КУ (базового уровня изоляции молнии), установка линейных разрядников и т. д. При внедрении нового метода защиты требуются определенные инвестиции, и анализ затрат и выгод является частью каждого такого проекта.

Молниеносные характеристики КУ могут быть оценены с помощью простых эмпирических формул [1, с. 61] или путем прямой регистрации отключений КУ, вызванных молнией [2, с. 79].

Установка заземляющих проводов является основным методом защиты КУ от молнии. Обратные вспышки - это самые частые виды отключений в том случае, когда КУ оснащен проводами заземления. Снижение импеданса основания башни КУ может быть достигнуто с помощью бентонита. Встроенные провода, установленные ниже фазных проводников, также используются для снижения скорости отключения КУ, вызванной молнией [6, с. 124].

На наиболее критических участках, КУ могут быть установлены линейные разрядники. Для полного снижения отключений КУ разрядники перенапряжения должны быть установлены на каждой фазе [3, с. 67]. При использовании линейных разрядников на КУ среднего напряжения на местности с высоким удельным сопротивлением грунта могут возникнуть проблемы при ударе молнии с большой амплитудой тока вблизи вершины башни, что приводит к протеканию большей части тока через разрядники. В такой ситуации энергия, поглощаемая разрядником, может превысить его емкость и разрядник может быть разрушен [5, с. 159].

В данной работе анализируется новый вид КУ-защиты от молний. Вместо стандартного заземляющего провода, размещенного в верхней части башен КУ, анализируется внешняя система заземляющих проводов для защиты КУ. Эта система защиты графически представлена на рис. 1, провода заземления на внешних опорах устанавливаются с обеих сторон защищаемого КУ таким образом, чтобы вероятность отказа экранирования была ничтожно мала. Таким образом, удары молнии происходят только на внешнюю систему защиты и на УК влияют только наведенные перенапряжения. Влияние наведенных перенапряжений уменьшается с увеличением номинального напряжения системы [4, с. 51].

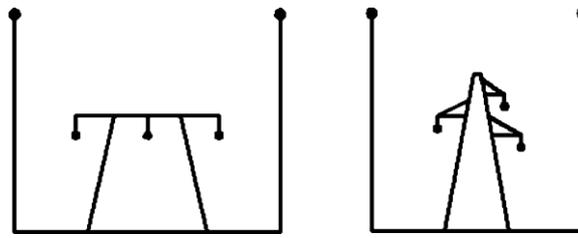


Рисунок 1. Система защиты внешнего заземляющего провода (ВЗП) от ударов молнии для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) конфигурации фазных проводников

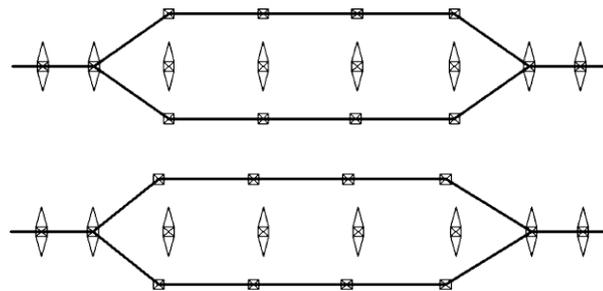


Рисунок 2. Система защиты ВЗП на наиболее критических участках УК

Конфигурация системы защиты внешнего заземляющего провода (ВЗП) для наиболее уязвимых участков УК показана на Рис. 2 (вверху). Когда расстояние между внешней башней и опорами башни УК невелико, существует возможность их взаимодействия при ударе молнии в систему внешней защиты.

В этом случае расстояние между заземлениями может быть увеличено путем перестановки наружных башен вдоль пролета, Рис. 2 (внизу).

### 1 Определение размеров внешней системы защиты

Существует два сценария, в которых может произойти отключение на УК, защищенном внешней системой защиты:

а) отказ экранирования внешней системы защиты и прямой удар по башне УК или фазному проводнику, обозначенному (а) на рис. 3.

б) вспышка от точки удара молнии по внешней системе защиты до фазного проводника УК, отмеченная знаком (б) на рис. 3.

Три измерения из рис. 3,  $D$ ,  $L$  и  $H$ , должны быть правильно рассчитаны, чтобы избежать этих сценариев:

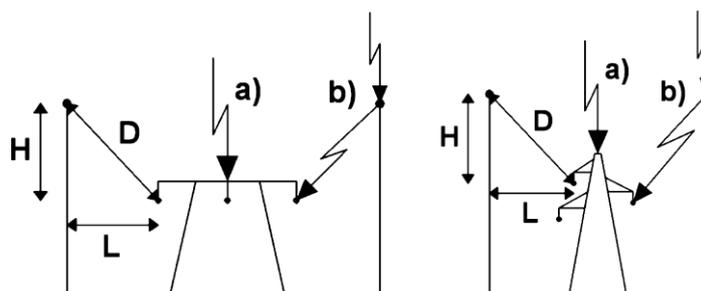


Рисунок 3. Сценарии, в которых может произойти отключение УК, защищенного внешней системой защиты, для горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) конфигурации фазных проводников

$D$ -расстояние между ВЗП и УК фазным проводником [м]. Это должно быть определено таким образом, чтобы свести к минимуму вероятность вспышки от ВЗП к фазному проводнику при ударе молнии в ВЗП.  $L$ -расстояние между внешней башней и фазовым проводником УК [м]. Это должно быть определено таким образом, чтобы свести к минимуму вероятность вспышки от внешней башни к фазному проводнику УК при ударе молнии в верхнюю часть башни.

$H$ -высота ВЗП над фазными проводниками УК [м]. Это должно быть определено таким образом, чтобы свести к минимуму вероятность отказа экранирования внешней системы защиты.

## 1.1 Определение расстояния между ВЗП и фазного провода ВЛ – Д

ВЗП можно разместить как можно ближе к защищенному УК, чтобы обеспечить низкую вероятность отказа экранирования. Минимальное расстояние определяется таким образом, чтобы существовала низкая вероятность вспышки от точки удара молнии в ВЗП до защищенного УК. Расстояние  $D$  моделируется как воздушный зазор с характеристикой вспышки модели лидерной прогрессии (1) и эта модель реализована в программе ЕМТР-АТР:

$$v = 170 \cdot d \cdot \left[ \frac{u(t)}{d-1} - E_0 \right] \cdot e^{(0,0015 \cdot \left( \frac{u(t)}{d} \right))} \quad (1)$$

где  $d$ -расстояние воздушного зазора [м],  $u(t)$  - мгновенное значение перенапряжения [кВ],  $l$ -длина лидера [м],  $E_0$ -критический градиент начала лидера [кВ/м], следует использовать значение около 545 [кВ/м].

В практических расчетах временем зарождения короны в УК можно пренебречь, а временем распространения стримеров можно пренебречь, когда приложенное напряжение достигает значения  $E_0$ . Ведущая скорость должна быть смоделирована уравнением (1).

Импеданс основания башни вычисляется с помощью уравнения для полусферической конфигурации. Импульсная модель импеданса основания башни уменьшает максимальные перенапряжения, так что более критические результаты получаются при пренебрежении частотной зависимостью параметров грунта.

Максимальные перенапряжения на внешней системе защиты возникают в том случае, когда молния ударяет в середину пролета ВЗП, и этот случай анализируется при расчете расстояния  $D$ . Это предполагается, что вспышка от ВЗП к фазному проводнику УК происходит от точки удара молнии в середине ЭГВ. Расстояние  $D$  не должно быть короче зазора УК для коммутации импульсного напряжения. Это важно в том случае, когда малые значения расстояния  $D$  (например, 1,7 м).

## 1.2 Определение расстояния между внешними башни и ВЛ– L

Минимальное расстояние  $L$  определяется таким образом, чтобы существовала низкая вероятность вспышки от внешней башни к фазному проводнику ОНЛ в случае удара молнии в вершину внешней башни. Расчет выполняется так же, как и расчет расстояния  $D$ , только точка удара молнии находится на вершине внешней башни, а вспышка возникает от внешней башни к фазному проводнику УК.

Расстояние  $L$  не должно быть короче зазора УК для импульсного напряжения переключения. Это важно в том случае, когда рассматриваются малые значения расстояния  $L$  (например, 1,1 м).

## 1.3 Определение высоты ВЗП над фазными проводниками УК – Н

Предполагается, что провисание фазных проводников УК и провисание ВЗП одинаковы. В этом случае высота внешних башен над башнями УК почти такая же, как высота ВЗП над проводниками верхней фазы УК.

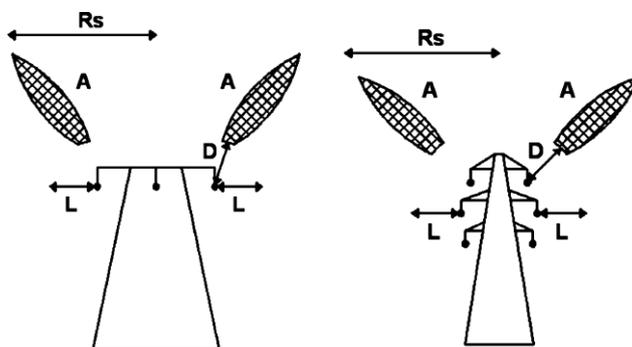


Рисунок 4. Возможные положения ВЗП при горизонтальном (слева) и вертикальном (справа) расположении проводников

Для защиты УК от сбоев экранирования ВЗП следует размещать в области, обозначенной как  $A$  на рис. 4. Область  $A$  можно легко нарисовать для любого значения расстояния удара  $R_s$  и для любого значения расстояния  $D$  с помощью метода катящейся сферы или электрогеометрической модели. Внешние опоры должны располагаться как минимум на расстоянии  $L$  от фазных проводников УК.

С точки зрения отказов экранирования эффективность системы внешней защиты зависит от амплитуды тока молнии, которая применяется при расчетах конфигурации системы внешней защиты. Для очень важных объектов предполагаемая амплитуда тока молнии составляет 3 кА, что происходит с вероятностью 1%, или с вероятностью 0,23%. С увеличением минимального тока отказа экранирования вероятность отказа экранирования возрастает, поэтому предлагается значение 3 кА. Величина расстояния удара, соответствующая току молнии 3 кА, равна 20 м (2):

$$R_S = k \cdot I^a = 10I^{0,65} \quad (2)$$

, где I-амплитуда тока молнии [кА], а k, A-константы.

Применение этих значений для амплитуды тока молнии, а также для дальности удара в методе катящейся сферы приводит к 99% эффективности защиты от отказов экранирования.

## **2 Результаты эксперимента**

Эксперимент проводился на модели с масштабированными размерами. Размеры D и L определены на рис. 3. Из-за этого изменяются характеристики грунта, распространение импульсных напряжений на внешнюю систему защиты, уменьшение времени фронта и хвоста импульсного напряжения за счет масштабных размеров экспериментальной установки и т. д. не имели значения в эксперименте. Эксперимент проводился при стандартном импульсном напряжении молнии формы волны 1,2 / 50 мкс. Выходное напряжение импульсного генератора было установлено на максимальное значение около 410 кВ.

Эксперимент проводился для стандартного расстояния удара 50 см, что эквивалентно 20 м в реальном масштабе. Размеры экспериментальной установки были увеличены в 40 раз. Фазные проводники А ВЗП были смоделированы с помощью медных проводов диаметром 1,5 мм.

Разряды молнии, проникающие в испытательную систему, не имеют вероятности поражения, защищенного ОХЛ. Этот вывод получен как из экспериментальных, так и из имитационных результатов. По результатам эксперимента разряд представляющий собой ступенчатый лидер, идущий вертикально к оси КУ, имеет вероятность почти 50% попасть в защищаемый УК. Конфигурация внешней защитной системы рассчитана на дальность поражения 20 м, поэтому вероятность отказа экранирования составляет 0,5%.

### **3 Заключение**

Проанализирован новый вид КУ-защиты от молний на основе ВЗП. Защита имеет такие преимущества как:

- 1) Этот вид защиты обеспечивает экстремальные отрицательные углы экранирования, которые минимизируют индукционные потери в КУ и обеспечивают отличную защиту от сбоев экранирования;
- 2) высота башни КУ и ветровая нагрузка башен и их фундаментов могут быть уменьшены путем применения этого типа защиты.

Общий вывод об этом типе защиты заключается в том, что технология внешней защиты является дорогостоящим вариантом, но обеспечивает отличные молниеносные характеристики для защищаемого КУ.

Этот тип защиты предлагается не для широкого использования, а для решения конкретных проблем, связанных с молнией, которые не могут быть решены путем применения стандартных методов защиты КУ. Существуют различные методы защиты для улучшения молниеносных характеристик КУ, но только линейные разрядники и представленная внешняя система защиты могут устранить отключения КУ, вызванные молнией.

Когда скорость отключения КУ должна быть снижена до нуля применением линейных разрядников, они должны быть установлены на каждой фазе и на каждой башне защищаемой секции КУ. При необходимости высокой эффективности в течение длительного периода времени необходим постоянный контроль за работой разрядников и замена разрушенных разрядников, что значительно увеличивает затраты на техническое обслуживание.

Учитывая вышесказанное, можно отметить следующие преимущества технологии внешней защиты по сравнению с линейными разрядниками:

1) При применении системы внешней защиты можно за длительный период времени снизить скорость отключения КУ до нуля даже на участках с очень высоким удельным сопротивлением грунта;

2) Эффективность системы внешней защиты постоянна в течение всего периода эксплуатации, в то время как разрядники должны контролироваться и заменяться для поддержания высокого уровня эффективности;

3) Затраты на техническое обслуживание, эффективность и надежность этой системы защиты лучше по сравнению с технологией защиты линейных разрядников, но первоначальные затраты выше;

4) Этот вид защиты можно использовать для защиты от вспышек пролета и отказов экранирования. Линейные разрядники защищают КУ от вспышек на линейных изоляторах, но все же существует вероятность вспышки пролета, когда молния с большой амплитудой тока ударяет в середину длинного пролета. Кроме того, линейные разрядники не защищают КУ от отказов экранирования, что в некоторых случаях может привести к проблемам.

В первых двух случаях система внешней защиты защищает как КУ от вспышек, так и оборудование подстанции от грозовых перенапряжений, что позволяет снизить нагрузку на оборудование.

#### **Библиографический список:**

1. Сухачев И. С., Чепур П. В. Общие вопросы и проблемы нормативной документации по молниезащите и заземлению на объектах топливно-энергетического комплекса // *Фундаментальные исследования*. 2016 № 3 С. 301–304.

2. Шишигин С. Л. Предложения по совершенствованию стандартов молниезащиты, заземления, ЭМС // *Энергетик*. 2017 № 2 С. 31–32.

3. Техника высоких напряжений: изоляция и перенапряжения в электрических системах / Под общ. ред. В. П. Ларионова. М.: Энергоатомиздат, 1986 464 с.

4. Шишигин С. Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Электричество. 2010 № 1 С. 16–23.

5. Сухачев И. С., Чепур П. В. Разработка программного алгоритма эффективной молниезащиты // Фундаментальные исследования. 2014 № 11 С. 291–295.

6. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Энергосервис, 2003. – 162 с