

**ВОПРОСЫ ТЕХНИКИ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

УДК 621.316.91

А. В. Косоруков, Н. Б. Кутузова, С. А. Пашичева, В. В. Титков

**Устройство защиты от импульсных перенапряжений в сети НН КТП**

Ограниченные возможности изоляции электрооборудования низкого напряжения противостоять грозовым перенапряжениям обуславливают необходимость применения устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП). В частности, проблема ограничений грозовых перенапряжений возникает при эксплуатации электрооборудования 0,4 кВ комплектных трансформаторных подстанций (КТП). Причиной грозовых перенапряжений в этом случае являются удары молнии, как непосредственно в КТП, так и в отходящие (0,4 кВ) и питающие (6–20 кВ) линии. В результате исследований показана возможность возникновения опасных перенапряжений в сети 0,4 кВ трансформатора путем их передачи с высоковольтной обмотки. Для защиты от данного вида перенапряжения даны рекомендации по выбору и применению УЗИП.

*Ключевые слова:* УЗИП, прямой удар молнии, КТП, трансформатор.

**Введение**

УЗИП – это устройство, предназначенное для ограничения перенапряжений и отвода импульсных токов, которое может быть выполненное на основе разрядника (УЗИП коммутирующего типа), диода или варистора (УЗИП ограничивающего типа), либо содержащее одновременно ограничивающие и коммутирующие элементы (УЗИП комбинированного типа). В зависимости от метода испытаний УЗИП делятся на классы: УЗИП класса I актуальны для защиты от прямых ударов молнии в систему молниезащиты объекта или воздушную линию электропередач; УЗИП класса II не испытываются импульсом тока 10/350 мкс, они обеспечивают защиту от индуцированных перенапряжений; УЗИП класса III предназначены для защиты потребителей от остаточных перенапряжений после срабатывания УЗИП первой и второй ступеней защиты при применении каскадной схемы защиты объекта.

В настоящее время не существует установившейся точки зрения в отношении применения УЗИП в сетях 0,4 кВ. При этом в технических решениях можно встретить, как формальное применение УЗИП, не учитывающее особенностей сети и размещения КТП, так и отказ от какой-либо защиты от грозовых перенапряжений. Вместе с тем ограниченное число вариантов исполнения КТП, а также их относительная компактность делают целесообразными попытки выработки общих подходов по разработке грозозащиты сетей 0,4 кВ.

Грозовые перенапряжения в сети 0,4 кВ могут появиться в результате каждого из следующих событий:

- удар молнии в отходящие ВЛ 0,4 кВ;
- удар молнии в КТП;
- удар молнии в ВЛ 6–20 кВ.

Далее будет рассмотрен каждый случай в отдельности.

## 1. Удар молнии в отходящие ВЛ 0,4 кВ

В зависимости от числа грозочасов для типовых высот опор ВЛ 0,4 кВ в 1 км линии на открытом пространстве ожидается от 1 до 10 ударов молнии за 30 лет эксплуатации (табл. 1, оценка выполнена по методике [1]). В случае если ВЛ экранирована объектами аналогичной высоты, поражаемость уменьшится в 2 и более раз. Таким образом, для КТП, имеющих отходящие ВЛ 0,4 кВ на открытом пространстве (здесь и далее подразумевается, что на расстоянии до 3 высот опоры отсутствуют объекты с сопоставимой высотой), удар молнии в ВЛ считается расчётным случаем.

Таблица 1

Оценка грозопоражаемости 1 км ВЛ 0,4 кВ за 30 лет

| Высота опоры, м | Количество грозочасов |     |     |     |      |
|-----------------|-----------------------|-----|-----|-----|------|
|                 | 10                    | 20  | 40  | 60  | 80   |
| 6               | 0,8                   | 1,7 | 3,3 | 5,0 | 6,6  |
| 7               | 1,0                   | 1,9 | 3,8 | 5,7 | 7,6  |
| 8               | 1,1                   | 2,1 | 4,3 | 6,4 | 8,6  |
| 9               | 1,2                   | 2,4 | 4,8 | 7,1 | 9,5  |
| 10              | 1,3                   | 2,6 | 5,2 | 7,8 | 10,4 |

Согласно Правилам устройства электроустановок [2] величина сопротивления ЗУ опор ВЛ с повторным заземлением PEN проводника или аппаратами составляет на грунте с хорошей проводимостью 30 Ом, а в остальных случаях не нормируется. При данных условиях даже при малых токах молнии потенциал опоры относительно проводов ВЛ будет настолько большим, что электрической прочностью изоляции на пораженной опоре можно пренебречь. Необходимо отметить, что последнее обстоятельство, с точки зрения применения УЗИП в сетях TN, делает оптимальным использование схемы подключения 3-0 (все фазы – заземление), так как воздействие одинаково для всех проводников линии, изолированных от заземляющего устройства.

Для металлических и железобетонных опор в результате стекания тока молнии в заземляющие устройства уровень перенапряжений снижается по мере удаления от точки удара.

Для деревянных опор данный процесс также характерен, однако имеет меньшее значение. Механизм распространения перенапряжений следующий: перекрытие изоляции на поражённой опоре, вынос потенциала поражённой опоры по проводникам линии, перекрытие изоляции на соседних опорах за счёт большего падения потенциала на PEN/PE проводниках, чем на фазах и в конечном итоге воздействие на КТП. При ударе молнии в провод перекрываются воздушные промежутки в точке удара и изоляторы на ближайших опорах.

В статье [3] было показано, что использование СИП и экранированного кабеля в конструкции ВЛ 0,4 кВ хоть и приводит к снижению повреждений линии (уменьшается количество опор с поврежденной изоляцией), однако, удар молнии вызывает множественные повреждения в сети 0,4 кВ.

Уровень перенапряжений значительно снижается благодаря уравниванию потенциалов между опорами и КТП за счёт протекания тока по РЕ/PEN проводникам, экранам КЛ (при подвеске КЛ), несущим элементам СИП.

Важным вопросом является оценка длины максимального расстояния от КТП, при ударе молнии на котором возможно повреждение изоляции в РУ 0,4 кВ. Величина перенапряжений будет зависеть от многих факторов: амплитуды тока молнии, формы импульса (в значительной мере времени фронта). Результаты оценок при типичном пролете 50 м, сопротивлении ЗУ опор 50 Ом и замещении опор сосредоточенными индуктивностями 8 мкГн приведены в табл. 2. При расчёте уровень допустимых перенапряжений в РУ принят равным 6 кВ (максимально для оборудования 0,4 кВ). ВЛ в противоположном от КТП направлении принята однородной без учёта возможности подключения ЗУ с низким сопротивлением (аналог линии освещения с односторонним питанием или линии к потребителю). Для упрощения считаем, что удары молнии происходят только в опоры.

Таблица 2

Оценка длины опасного подхода, м для ВЛ 0,4 кВ

| $I_m$ ,<br>кА | Время фронта, мкс |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|               | 1                 | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
| 10            | 150               | 100 | 100 | 100 | 100 | 50  | 50  | 50  |
| 20            | 150               | 150 | 150 | 150 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 40            | 200               | 200 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| 60            | 250               | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 150 |
| 80            | 300               | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| 100           | 300               | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |

Таким образом, при наличии отходящих ВЛ 0,4 кВ при принятии решения об использовании УЗИП необходимо рассматривать условия прохождения их трассы на отрезке до 300 м от КТП, что значительно по отношению к типичным длинам подобных линий.

При рассмотрении ВЛ с СИП длины опасных подходов сокращаются до 150 м.

При уменьшении длин пролетов до 30 метров протяженность опасного подхода для случая ВЛ сокращается до 200–250 м, что объясняется увеличением количества точек стекания тока молнии в грунт при множественных перекрытиях изоляции.

Увеличению уровня перенапряжений в РУ КТП способствует также повышение прочности изоляции ВЛ.

Необходимо отметить, что согласно ПУЭ (п. 7.1.22) при воздушном вводе необходимо устанавливать ОПН (жилые и общественные здания), рекомендация оправдана, но требует уточнения: для открытой местности необходим УЗИП класса I, при экранированной лесом ВЛ – класса II. Во всех случаях необходимо использовать УЗИП непосредственно в РУ, так как размещение на опорах гораздо менее эффективно: увеличивается расстояние до защищаемого оборудования как по токоведущим частям, так и по проводникам заземления. В случае отсутствия соединения заземления опоры с заземлением КТП эффективность применения защитных аппаратов на опоре ВЛ становится ничтожной из-за больших величин сопротивления ЗУ.

## 2. Удар молнии в КТП

С учётом малых типичных размеров электроустановок при установке КТП на открытой местности удар молнии является расчётным случаем. Необходимо отметить, что при оснащении КТП системой молниезащиты удар молнии также должен признаваться расчётным событием, так как в противном случае возникает несогласованность инженерных решений.

Ток молнии стекает с объекта через ЗУ и отходящие коммуникации: экраны КЛ, несущие элементы СИП, РЕ и PEN проводники. Верхнюю границу напряжения на изоляции можно оценить как произведение тока молнии на входное сопротивление объекта.

Входное сопротивление по мере увеличения длин линий до потребителей стремится к величине сопротивления уединённого заземляющего устройства КТП. Однако наличие экранов, соединённых с иными ЗУ, и проводников отходящих линий снижает величину сопротивления заземления. Таким образом, для оценки напряжения на изоляции при воздействии тока молнии входное импульсное сопротивление может быть измерено для объектов, находящихся в эксплуатации, либо должно быть рассчитано с учётом наличия отходящих коммуникаций при проектировании.

## 3. Удар молнии в ВЛ 6–20 кВ

Удар молнии является расчётным случаем при прохождении ВЛ 6–20 кВ по открытой местности. Проникновение перенапряжений в сеть 0,4 кВ происходит путём перехода воздействия с одной обмотки трансформатора на другую.

На учебном комплексе ПАО «Ленэнерго» для трансформаторов разной мощности были произведены измерения коэффициентов передачи напряжения от первичной обмотки к вторичной для различных форм сигнала.

При воздействии апериодических импульсов (рис. 1), характерных для прямых ударов молнии, импульс значительно затухает при прохождении трансформаторов.

При воздействии затухающих колебаний (рис. 2) импульс проходит трансформатор, практически не затухая. Для некоторых трансформаторов отмечены случаи резонанса на частотах близких к 1 МГц, при которых напряжение на вторичной обмотке превосходило напряжение на стороне 10 кВ. Такое воздействие характерно для воздействия индуктированных или коммутационных перенапряжений.

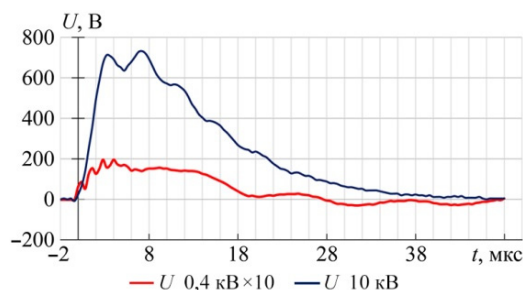


Рис. 1. Напряжение на обмотках трансформатора 10/0,4 кВ при подаче импульса 1,2/50 мкс на обмотку 10 кВ

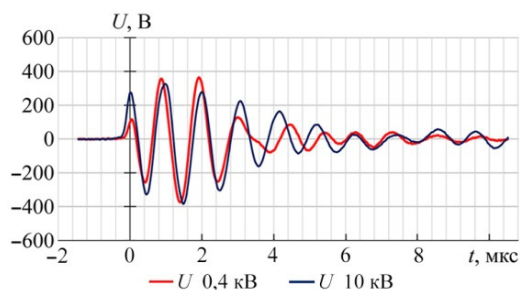
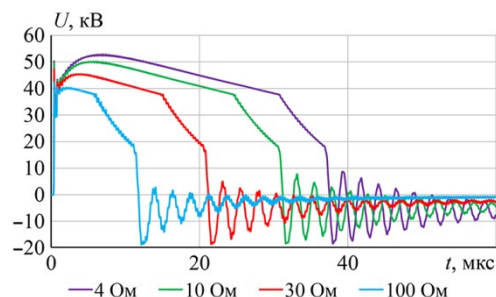


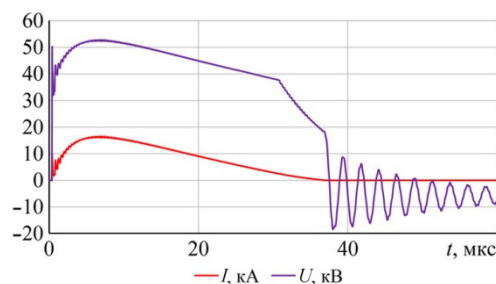
Рис. 2. Напряжение на обмотках трансформатора 10/0,4 кВ при подаче затухающего колебательного импульса частотой 1 МГц

В соответствии с теоретическими представлениями [4], учитывая высокие частоты воздействий, схема замещения силового трансформатора может быть представлена в виде П-образного четырёхполюсника, состоящего из ёмкостных элементов величиной порядка 1000 пФ [5].

Отметим, что из-за перекрытий изоляции переходный процесс при прямом ударе молнии в ВЛ 6–20 кВ носит именно колебательный характер. На рис. 3 приведены типичные осциллограммы напряжения в РУ 10 кВ при близком ударе в ВЛ и наличии на шинах РУ ОПН с наибольшим длительно допустимым рабочим напряжением 12,7 кВ. Расчёты выполнены методом бегущих волн с учётом резистивных потерь, скин-эффекта и потерь в грунте для многопроводных ВЛ. В процессе расчётов варьировалась величина сопротивления заземляющего устройства КТП (4, 10, 30, 100 Ом). После удара молнии напряжение растёт, что приводит к увеличению проводимости ОПН. С уменьшением сопротивления ЗУ время заряда ёмкости трансформатора снижается, в то время как длительность тока, протекающего через ОПН, растёт (рис. 4). Как только напряжение снижается до величин, меньших, чем наибольшее рабочее напряжение ОПН, характер процесса изменяется. Параметры последующих колебаний зависят от длительности импульса, расстояний между КТП и опорами с повреждениями изоляции, величин сопротивления заземляющего устройства КТП и опор и т. п. Если учесть, что перенапряжения могут переходить на сторону низкого напряжения практически не ослабляясь, то их предельный уровень будет соответствовать остающимся напряжениям на ОПН высоковольтной обмотки трансформатора, т. е. может превышать испытательные напряжения для оборудования 0,4 кВ.



**Рис. 3.** Напряжение на обмотках трансформатора 10 кВ при близком ударе молнии



**Рис. 4.** Напряжение на обмотках трансформатора 10 кВ (синий) и ток через ОПН (красный) при сопротивлении ЗУ КТП – 4 Ом

Принимая во внимание компактные размеры КТП с воздушным вводом, ожидаемый ток через УЗИП можно оценить с помощью формулы:

$$I_{\text{узип}} = \frac{U_{\text{опн}}}{Z}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{опн}}$  – остающееся напряжение ОПН высоковольтной обмотки;

$Z$  – сопротивление заземляющего устройства КТП.

Следует учитывать, что характер воздействия не будет импульсным. При этом вследствие относительно высокой длительности воздействия энергетические параметры УЗИП в большей степени соответствуют классу I.

## Выводы

Установка устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) в РУ 0,4 кВ целесообразна в следующих случаях:

- наличие воздушной линии 0,4 кВ;
- наличие воздушной линии 6–20 кВ;
- размещение КТП на открытой местности;
- наличие системы молниезащиты.

При выборе класса УЗИП целесообразно руководствоваться следующими критериями.

При прохождении ВЛ 0,4 по открытой местности на расстоянии до 250–300 м или линии с СИП на расстояниях до 200 м от КТП требуется применение УЗИП класса I. В случае если открытый участок находится дальше от КТП, требуется применение УЗИП класса II.

При отсутствии ВЛ 0,4 кВ и наличии ВЛ 6–20 кВ, в которые возможен удар молнии, существует опасность воздействия на РУ 0,4 кВ перенапряжений, переходящих с обмотки высокого напряжения. Для их ограничения также требуется применение УЗИП класса I.

## Список литературы

1. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / под научной редакцией Н. Н. Тиходеева. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 355 с.
2. Правила устройства электроустановок / Госэнергонадзор Минэнерго России. – 6-е и 7-е изд. – Санкт-Петербург : ДЕАН, 2008. – 1168 с.
3. О применении УЗИП для защиты сетей освещения / П. Н. Карпов, А. В. Косоруков, Н. Б. Кутузова, С. А. Пашичева, В. В. Титков // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – № 4 (61) – С. 78–83.
4. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: учебник / К. П. Кадомская, Ю. А. Лавров, А. А. Рейхердт. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 319 с.
5. Гринёв А. С. Особенности передачи грозových импульсов перенапряжения через силовые трансформаторы 6–35/0,4 кВ со схемой соединения обмоток «треугольник–звезда с выведенной нейтралью» / А. С. Гринёв // Научно-методический электронный журнал Концепт. – 2014. – № Т20. – С. 2376–2380.

*Косоруков Антон Владимирович*, канд. техн. наук, главный специалист АО «Ленгидропроект». E-mail: kosorukov\_anton@inbox.ru

*Кутузова Наталья Борисовна*, руководитель направления НЗУ, АО «НПО «Стример». E-mail: natalia.kutuzova@streamer.ru

*Пашичева Светлана Александровна*, аспирант высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: pashicheva.sv@gmail.com

*Титков Василий Васильевич*, доктор техн. наук, профессор высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: titkov\_vv@spbstu.ru