

## АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ВАРИАНТ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ\*

Е. А. Печагин<sup>1</sup>, В. А. Чернышов<sup>2</sup>, Б. Н. Мешков<sup>2</sup>

*Кафедра «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия (1);  
кафедра «Электроснабжение», ФГБОУ ВО «Орловский государственный  
аграрный университет», г. Орел, Россия (2); pechagin\_ea@mail.ru*

**Ключевые слова:** воздушная линия электропередач; замыкание на землю; изолированная нейтраль; изоляция; ограничение; перекрытие; перенапряжение.

**Аннотация:** Рассмотрен инновационный подход к проблеме ограничения токов замыкания на землю воздушных линий электропередач. Предложение позволяет ограничивать емкостные токи без применения источников реактивной мощности. Отмечена простота конструкции предлагаемого устройства, позволяющая при незначительных инвестициях, необходимых для приобретения и монтажа устройства, значительно сократить уровень аварийности воздушных линий электропередач и соответственно снизить расходы, связанные с ремонтом и поставками электроэнергии.

---

Склонность к аварийности воздушных линий (ВЛ) электропередач в сетях среднего напряжения 6–10 кВ не раз подтверждалась многочисленными исследованиями. Авария – устойчивое или устраняемое автоматически отключение сети в зависимости от причин, подразделяющихся на три категории:

1) ошибки при проектировании и строительстве (неустойчивость к климатическим нагрузкам, прохождение в зонах с повышенной вероятностью механических повреждений и т.д.);

2) недобросовестность эксплуатации ВЛ (несвоевременная выпилка трасс при прохождении ВЛ в лесных зонах, несвоевременная чистка и замена вышедшей из строя изоляции и т.д.); особенности эксплуатации ВЛ на специальных объектах. Примером могут служить карьерные сети, которые в силу своей специфики постоянно находятся в зоне риска повреждения техническими средствами;

3) ситуации, мало зависящие от действий человека, приводящие к авариям из-за особенностей конструкции ВЛ, традиционно применяемой в электрических сетях напряжением 6–10 кВ. При прочности как междуфазной, так и земляной изоляции ВЛ 6–10 кВ, значительно уступающей ВЛ более высоких классов напряжения, частота коммутаций и вызываемых ими перенапряжений значительно выше. Перекрытие изоляции на ВЛ 6–10 кВ наступает при каждом прямом поражении молнией [1]. При этом низкая категорийность электроснабжения потребителей в данном классе напряжения (в большинстве случаев категории 2 и 3) не способствует развитию стопроцентной резервируемости.

---

\* По материалам доклада на конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах», г. Тамбов, 25 – 27 апреля 2016 г.

Для исследований, посвященных проблематике надежности и безопасности эксплуатации сельских распределительных сетей общего назначения, категория 3 причин представляется наиболее привлекательной. Разрешение первых двух предполагается при повышении качества проектных, строительных и работ по организации эксплуатации ВЛ.

Отмеченный низкий уровень прочности изоляции ВЛ 6–10 кВ часто становится причиной замыкания на землю (ЗНЗ). При нарушении изоляции одной из фаз в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью перерыва в электропитании потребителей не происходит. Но если в результате компенсации емкостного тока перенапряжение в сети имеет минимальное значение, то при работе с изолированной нейтралью изоляция фаз от земли испытывает линейные нагрузки. Несмотря на то что ее уровень обеспечивает защиту от указанного перенапряжения в полной мере (по справочным данным [2] выдерживаемое напряжение самого широко применяемого изолятора на ВЛ 6–10 кВ, ШФ10Г, даже под дождем составляет 42 кВ, а импульсное напряжение 100 кВ), статистика отключений в исследованиях [3] показывает, что 22,67 % приходится на повреждение элементов на опорах и трансформаторных подстанциях (ТП) (изоляторах, разрядниках, распределительных щитах и др.).

Высокий процент отключений объясняется сложностью и неоднородностью исполнения распределительных сетей напряжением 6–10 кВ. В системе присоединений к одной ТП могут встречаться и кабельные вставки, и коммутационные аппараты с различным уровнем прочности изоляции, и участки ВЛ с опорами различных типов. Уровень износа изоляции, вследствие различного срока эксплуатации оборудования в системе, может варьироваться в широких пределах. Основной же причиной выхода из строя изоляции в сетях с изолированной нейтралью являются перенапряжения, сопровождающие дуговые ЗНЗ. При малых емкостных токах, свойственных сетям напряжением 6–10 кВ, дуга при пробое или перекрытии изоляции неустойчива, что приводит к скачкам напряжения на «здоровых» фазах. В источнике [4] показано, что уровень перенапряжения на фазах в целях изоляцией может достигать  $4,26U_{\phi}$ , где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети.

Перенапряжения не единственная опасность, которую несут ЗНЗ, как показали исследования [5], емкостной ток, протекающий по опоре, представляет высокий уровень опасности для ВЛ, опоры которых выполнены на железобетонных стойках. В исследованиях [5] максимальная температура нагрева стойки током ЗНЗ составила 412 °С. При этом установлено, что уже при температуре 250 °С сцепление бетона с гладкой арматурой снижается на 85 %, а с арматурой периодического профиля – 40 %.

Кроме факта дестабилизации надежности работы электрической сети за счет износа изоляции, ЗНЗ на ВЛ создает риск поражения электрическим током людей и животных, оказавшихся в зоне растекания тока вокруг опоры ВЛ с поврежденной изоляцией. Соответственно ограничение емкостных токов и перенапряжений, возникающих при ЗНЗ, оказывает положительное влияние на работу и безопасность электрической сети в целом.

Дугогасящие реакторы (ДГР) традиционно используются для ограничения емкостных токов как в России, так и за рубежом. Устраняя ряд негативных факторов, создаваемых ЗНЗ, ДГР имеют определенные недостатки: высокую стоимость и необходимость перестройки ТП; сложность настройки под емкость разветвленной сети с распределенными параметрами и организацию селективной защиты от ЗНЗ, так как ток замыкания компенсируется практически до нуля.

Решением проблемы ограничения токов и напряжений, сопровождающих ЗНЗ, может стать безрезонансный ограничитель тока однофазного замыкания на землю (БОТОЗЗ). Он имеет простую и надежную конструкцию, что позволяет использовать его на каждой опоре ВЛ, незначительно увеличивая ее стоимость.

Конструктивно представляет собой ограничитель перенапряжения (ОПН), подобранный под линейное напряжение сети и включаемый между металлоконструкцией опоры ВЛ и заземляющим устройством (рис. 1).

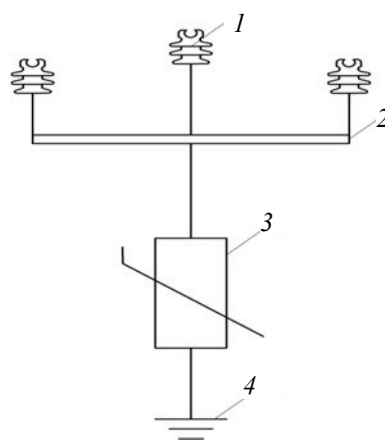
При выходе из строя одного из изоляторов, ЗНЗ отсутствует, БОТОЗЗ осуществляет функцию дополнительной изоляции между землей и фазой ВЛ. Ток через БОТОЗЗ определяется емкостью ОПН и исчисляется микроамперами.

Для подтверждения работоспособности устройства проведены лабораторные испытания, в ходе которых заземляющий выпуск стойки опоры отсоединялся от траверсы и присоединялся к ней через ОПН. Лабораторные испытания показали, что железобетон стойки в месте крепления к ней траверсы не обладает достаточной электрической прочностью для обеспечения функционирования устройства. При повышении напряжения между металлоконструкцией и землей (имитация повреждения изолятора) ток, протекающий через стойку опоры, приводил к срабатыванию токовой защиты лабораторной установки. При работе в действующей сети ток утечки через стойку будет препятствовать работе ограничителя. Данный факт показал необходимость выполнения изоляции между стойкой, траверсой и крепежным хомутом. При этом к изоляции предъявляются следующие требования:

- 1) электрическая прочность, достаточная для выдерживания линейного напряжения ВЛ неограниченный промежуток времени;
- 2) механическая прочность, обеспечивающая надежность крепления металлоконструкции опоры без разрушения материала;
- 3) стойкость к воздействию солнечного света и атмосферных осадков;
- 4) стойкость к перепадам температуры.

Требуемым условиям в качестве прокладочного изоляционного материала удовлетворяют большинство выпускаемых видов электротехнического текстолита. К достоинствам текстолитов, определяющим их выбор, следует отнести параметры [6]: высокие объемные удельные сопротивления от  $(1 \times 10^6)$  Ом·м; поверхностное удельное сопротивление  $(1 \times 10^{10})$  Ом; уровень механической прочности; низкий уровень водопоглощаемости; широкий диапазон рабочих температур (для некоторых видов от  $-65$  до  $105$  °С).

Выбор в качестве ограничивающего устройства элемента с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), каковым является ОПН, не случаен. Нелинейность ВАХ позволяет заземляющему устройству опоры сохранять свои грозозащитные функции. При перекрытии изоляции в результате разряда молнии в ВЛ или индуцированного перенапряжения, потенциал траверсы по отношению к земле значительно превышает напряжение срабатывания ОПН, что позволяет току беспрепятственно протекать через заземляющее устройство. Заметим, что в данном случае ОПН не обеспечивает защиту от грозовых перенапряжений, а не нарушая работоспособности существующего заземляю-



**Рис. 1. Однолинейная схема опоры с безрезонансным ограничителем тока однофазного замыкания на землю:**  
1 – изоляция опоры; 2 – металлоконструкция (траверса); 3 – нелинейный ОПН;  
4 – заземляющее устройство

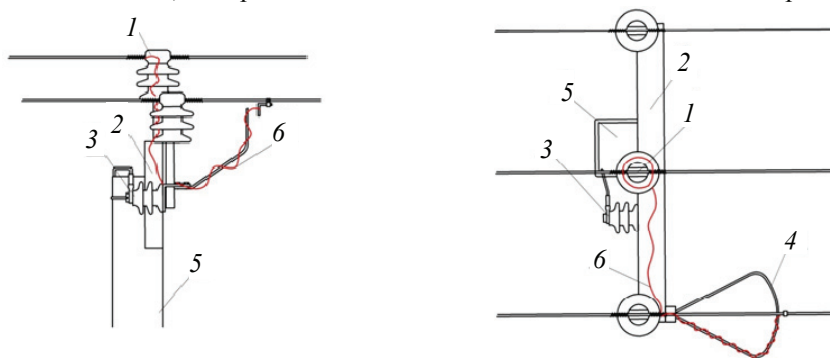
шего устройства, выполняет другую функцию – защиту электрической сети от ЗНЗ. Разумеется, что при этом вольт-секундная характеристика (ВСХ) ОПН ниже ВСХ изоляторов для исключения роста вероятности обратного перекрытия на соседние фазы при нарушении изоляции в результате грозовых перенапряжений.

При первичном взгляде на однолинейную схему опоры с БОТОЗЗ создается впечатление, что наличие устройства в цепи заземления противоречит пункту 1.7.139 [7]. Однако при более детальном рассмотрении норм, правомерность данного технического решения не вызывает сомнений. Заземление опор ВЛ в целях электробезопасности не производится. Назначение заземляющих устройств на опорах ВЛ – защита от грозовых перенапряжений. Факт наличия заземляющих устройств при ЗНЗ является причиной повышенной электроопасности ВЛ из-за образования разнопотенциальной зоны вокруг опоры.

Применение БОТОЗЗ требует пересмотра концепций релейной защиты от ЗНЗ, действующих как на сигнал, так и отключение. Ограничение тока ЗНЗ исключает возможность их использования. Факт нарушения изоляции при применении БОТОЗЗ можно обнаружить во время планового осмотра ВЛ или по участившимся случаям отключения фидера, на опоре которого повреждена изоляция при грозовой активности. Наличие на металлоконструкции опоры потенциала одной из фаз увеличивает вероятность междуфазного замыкания при перекрытии изоляции или срабатывания разрядника на любой из соседних. Однако общая частота отключений ВЛ значительно снизится из-за уменьшения числа перенапряжений в сети, вызванных ЗНЗ. Срабатывание токовой защиты возможно только при замыкании второй фазы на металлоконструкцию опоры с поврежденной изоляцией, а не на любой другой в сети, как в случае простого ЗНЗ без ограничения емкостного тока (рис. 2).

Если инвестировать в БОТОЗЗ дополнительные средства, возможно максимально упростить обнаружение опоры с поврежденной изоляцией. Для этого, помимо ОПН, в состав БОТОЗЗ войдут: источник питания, датчик наличия напряжения и устройство звуковой или визуальной сигнализации; возможно, их комбинированное использование (рис. 3, поз. 7, 8). В данном случае устройство обеспечит сигнализацию о повреждении изоляции на опоре, приближение к опоре безопасно, зона растекания тока и опасность поражения отсутствуют.

Сети с изолированной нейтралью не случайно имеют наибольшую протяженность в нашей стране. Отсутствие необходимости отключения при ЗНЗ одной из фаз позволяет не нарушать электроснабжение потребителей. Но не стоит забывать об опасностях, которые таит в себе заманчивая надежность изолированной



**Рис. 2. Развитие междуфазного замыкания при срабатывании разрядника на опоре с ЗНЗ:**

- 1 – неисправный изолятор; 2 – металлоконструкция (траверса); 3 – ОПН;
- 4 – разрядник длинно-искровой петлевой; 5 – железобетонная стойка;
- 6 – графическое изображение тока замыкания



**Рис. 3. Схема установки безрезонансного ограничителя тока однофазного замыкания на землю:**

- 1 – изоляция опоры; 2 – металлоконструкция (траверса);  
 3 – заземляющий проводник; 4 – железобетонная стойка;  
 5 – хомут; 6 – ОПН; 7 – устройство звукового оповещения;  
 8 – устройство визуального оповещения;  
 9 – изоляционная прокладка

нейтрали. Применение топографических – рассредоточенных по трассе ограничителей тока ЗНЗ позволяет «прикрыть» наиболее слабое место сети – ВЛ электропередач и при этом сохранить преимущество изолированной нейтрали.

Предлагаемое техническое решение предназначено для выполнения следующих задач:

- повышение надежности работы электрической сети за счет сокращения отключений линий электропередач, вызванных перенапряжениями при дуговых замыканиях на землю;
- увеличение уровня безопасности обслуживающего персонала и жителей, способных оказаться в зоне растекания тока замыкания на землю, образующейся вокруг опоры с неисправной изоляцией.

#### Список литературы

1. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений : РД 153-34.3-35.125-99 : утв. Первым заместителем председателя Правления РАО «ЕЭС России» : введ. в действие 12.07.1999. – СПб : Изд-во ПЭИПК, 1999. – 185 с.
2. Изоляторы для высоковольтных линий электропередачи // Отраслевой каталог на серийно выпускаемые изделия. – Южноуральск, 2009. – 152 с.
3. Наумов, И. В. Анализ уровня надежности сельских распределительных электрических сетей напряжением 10 кВ (на примере филиала восточных электрических сетей ОАО «ИЭСК» / И. В. Наумов, А. В. Ланин // Вестн. ИрГСХА. – 2010. – № 40. – С. 115 – 120.
4. Координация изоляции и перенапряжения в электрических высоковольтных сетях / В. И. Гуль [и др.]. – Харьков : ЭДЕНА, 2009. – 270 с.
5. Юндин, М. А. Определение характера и места однофазных повреждений в сельских электрических сетях 10 кВ : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Юндин Михаил Анатольевич. – М., 1984. – 259 с.
6. ГОСТ 2910–74. Текстолит электротехнический листовой. Технические условия. – Введ. 1976–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 11 с.
7. Правила устройства электроустановок : Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. – Новосибирск : Сиб. университетское изд-во, 2010. – 464 с.

## An Option of Capacitive Current Compensation for Overhead Power Lines of 6–10 kV

E. A. Pechagin<sup>1</sup>, V. A. Chernyshov<sup>2</sup>, B. N. Meshkov<sup>2</sup>

*Department of Electrical Engineering, “TSTU”, Tambov (1),  
Department of Electric Power Supply, Orel State Agricultural University, Orel (2),  
Russia; pechagin\_ea@mail.ru*

**Keywords:** ground fault; insulation; isolated neutral; limitation; overhead power line; overlap; overvoltage.

**Abstract:** The paper describes the innovative approach to the problem of limitation of ground faults of overhead power lines. The approach allows you to limit the capacitive currents without using the reactive power sources. The simplicity of the device design, low investment in purchase and installation of the device make it possible to reduce the level of accidents of overhead power lines significantly. Accordingly, it reduces the costs associated with the repair and electricity supply downtime.

### References

1. Pervym zamestitel'em predsedatelya Pravleniya RAO “EES Rossii”, *Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setei 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazhenii* : RD 153-34.3-35.125-99 [Guidelines for the protection of electrical networks 6-1150 kV against lightning and internal surge : Guidance document 153-34.3-35.125-99], St. Petersburg: Izdatel'stvo PEIPK, 1999, 185 p. (In Russ.)
2. [Insulators for high-voltage transmission lines], *Otraslevoi katalog na seriino vypuskaemye izdeliya* [Industry directory on commercially available products], Yuzhnoural'sk, 2009, 152 p. (In Russ.)
3. Naumov I.V., Lanin A.V. [Analysis of the level of reliability of rural power distribution networks 10 kV (for example, a branch of Eastern electric networks of “IESK”), *Vestnik IrGSKhA* [Vestnik IrGSHA], 2010, no. 40, pp. 115-120. (In Russ.)
4. Gul'V.I., Nizhevskii V.I., Khomenko I.V., Shevchenko S.Yu., Chevychelov V.A. *Koordinatsiya izolyatsii i perenapryazheniya v elektricheskikh vysokovol'tnykh setyakh* [Coordination of isolation and surge in electrical transmission systems], Kharkiv: EDENA, 2009, 270 p. (In Russ.)
5. Yundin, M. A. *PhD Dissertation (Technical)*, Moscow, 1984, 259 p. (In Russ.)
6. GOST 2910–74. *Tekstolit elektrotekhnicheskii listovoi. Tekhnicheskie usloviya* [Textolite Electrotechnical sheet. Specifications], Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 1998, 11 p. (In Russ.)
7. *Pravila ustroystva elektroustanovok : Vse deistvuyushchie razdely PUE-6 i PUE-7* [Regulations for Electrical Installation: All applicable sections of the SAE-6 and SAE-7], Novosibirsk: Sibirskoe universitetskoe izdatel'stvo, 2010, 464 p. (In Russ.)

---

### Alternative Variante der Kompensation der kapazitiven Ströme für die Fluglinien der Stromversorgungen mit der Spannung von 6–10 kV

**Zusammenfassung:** Es ist das innovative Herangehen an das Problem der Beschränkung der Ströme des Erdschlusses der Fluglinien der Stromversorgungen betrachtet. Der Vorschlag lässt zu, die kapazitiven Ströme ohne Anwendung der



Quellen der reaktiven Macht zu beschränken. Die Einfachheit der Konstruktion der angebotenen Einrichtung erlaubt es, bei der nichtbedeutenden Investitionen, die für den Erwerb und die Montage der Einrichtung notwendig sind, das Niveau der Unfallhäufigkeit der Fluglinien der Stromversorgungen wesentlich zu verringern. Sie lässt auch zu, die Kosten, die mit der Reparatur und mit den Betriebsunterbrechungen der Elektroenergielieferung verbunden sind, zu senken.

---

### **Variante alternative de la compensation des courants capacitifs pour les lignes électriques d'une tension de 6 à 10 kV**

**Résumé:** Est examinée une approche novatrice au problème de la limitation des courants de fuite à la terre des lignes électriques aériennes. L'offre permet de limiter les courants capacitifs sans application de sources de puissance réactive. La simplicité de la conception de l'appareil permet, à de petits investissements nécessaires pour l'acquisition et l'installation de l'appareil, de réduire le taux d'accidents des lignes aériennes, donc de réduire les coûts liés à la réparation et à l'arrêt de la fourniture d'électricité.

---

**Авторы:** *Печагин Евгений Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Вадим Алексеевич Чернышов* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение»; *Борис Николаевич Мешков* – аспирант кафедры «Электроснабжение», ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орел, Россия.

**Рецензент:** *Фесенко Александр Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение, электротехника и информационное обеспечение энергетических систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия

---