

# Применение резисторов для заземления нейтрали с целью повышения безопасности и надежности электроснабжения в сетях 6–35 кВ

**М. В. Ильных,**

ООО «Болид», г. Новосибирск, начальник научно-исследовательского отдела

**Н. И. Емельянов,**

ООО «Болид», г. Новосибирск, заместитель директора, кандидат технических наук, доцент

**Л. И. Сарин,**

ООО «Болид», г. Новосибирск, директор

Одним из основополагающих факторов, определяющих свойства сетей 6–35 кВ, является режим заземления нейтрали. Широко применяемые в распределительных сетях режимы изолированной либо заземленной через дугогасящий реактор нейтрали обладают рядом принципиальных недостатков, связанных с однофазными замыканиями на землю (перенапряжения различного вида, сложность организации селективной релейной защиты от однофазных замыканий на землю и др.). Решить указанную проблему можно применением резистивного или комбинированного (нейтраль заземлена через параллельно включенные дугогасящий реактор и резистор) режима заземления нейтрали. На основании анализа зарубежного и отечественного опыта эксплуатации сетей среднего класса напряжения и собственных разработок авторов в области оптимизации режима нейтрали приведены основные преимущества резистивного и комбинированного режимов заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ, определены области применения высокоомных и низкоомных резисторов заземления нейтрали. Представлена информация о предлагаемых резисторах, показаны их особенности и преимущества, обобщен опыт их эксплуатации.

**Ключевые слова:** электробезопасность, режим заземления нейтрали, перенапряжение, однофазное замыкание на землю, резистор заземления нейтрали.

Работа электрических сетей 6–35 кВ сопровождается возникновением перенапряжений различного вида и уровня. За счет перенапряжений происходит значительное число повреждений ответственного электрооборудования, зачастую с последующим развитием аварии с каскадным отключением нескольких присоединений, в ряде случаев – с погасанием секций и отключением подстанции в целом. Несмотря на значительное многообразие сетей 6–35 кВ, можно говорить о том, что основополагающим фактором, определяющим свойства этих сетей, является режим заземления нейтрали сети. Он определяет величины различных видов перенапряжений, воздействующих на изоляцию всей электрически связанной сети, и в конечном итоге определяет исход аварийных событий, степень тяжести аварийных повреждений, время ликвидации аварии и в целом надежность электроснабжения. Задачи ограничения перенапряжений, исключения феррорезонансных явлений, организации селективной защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях 6–35 кВ могут быть решены путем перехода к резистивному или комбинированному режиму заземления нейтрали.

## Перенапряжения в сетях 6–35 кВ

Основной недостаток работы сети в режиме изолированной и компенсированной нейтрали – это

возможность возникновения однофазного замыкания на землю через перемежающуюся дугу, которое приводит к значительным перенапряжениям на неповрежденных фазах [1–3]. Доля таких однофазных дуговых замыканий на землю (ОДЗ) среди всех видов аварий весьма значительна – до 80 %.

Однофазные дуговые замыкания на землю с перемежающейся дугой в месте замыкания оказывают воздействие на изоляцию оборудования сети. Возникающие при ОДЗ перенапряжения опасны для электроустановок своей высокой кратностью ( $3...3,5$ ) $U_{ф\ max}$ , своей продолжительностью и широкой охвата сети, электрически связанной с местом повреждения. Воздействие этих перенапряжений приводит к перекрытию или пробоем дефектной или ослабленной изоляции оборудования, к развитию аварийной ситуации с переходом однофазного замыкания на землю в межфазные короткие замыкания и множественные повреждения, к накоплению и развитию дефектов изоляции.

Значительную опасность для электрооборудования в рассматриваемых сетях представляет возникновение перенапряжений при феррорезонансных явлениях. Устойчивый феррорезонанс возможен при выполнении условий равенства реактивных параметров схемы на конкретном уровне перенапряжений и условий по балансу энергии. При попадании значения емкости сети в резонансный

диапазон феррорезонансные перенапряжения имеют максимальное значение и достигают величин  $U_{\max} \geq 3U_{\text{ф max}}$ . Данный режим опасен возникновением длительных перенапряжений высокой кратности на основной частоте и на субгармониках, возникновением свертков в обмотках измерительных трансформаторов напряжения с их дальнейшим повреждением.

В сетях 6–35 кВ с дугогасящими реакторами (ДГР) при резонансной настройке возможно возникновение значительного смещения нейтрали сети с возникновением длительных перенапряжений высокой кратности на основной частоте. При установке ДГР схема сети представляет собой резонансный контур, в котором возможны значительные повышения напряжения на индуктивности катушки. Повышение напряжения на реактированной нейтрали в нормальном режиме происходит за счет резонанса напряжений в контуре: емкость линии – индуктивность ДГР. При резонансном заземлении и большой добротности реактора  $q = X_p/R_p$  напряжение на нейтрали может быть упрощенно определено с помощью выражения [3]:

$$U_N = q \cdot U_{N_{XX}},$$

где  $U_{N_{XX}}$  – напряжение несимметрии сети (ДГР отсутствует).

Поскольку добротность современных ДГР весьма велика (50–100), то даже при небольшой несимметрии сети при точной настройке катушки (или при попадании настройки катушки в резонанс), на нейтрали и, следовательно, на фазах могут возникнуть опасные перенапряжения. В нормальном режиме эксплуатации смещение нейтрали может возникнуть в основном из-за различия емкости фаз ВЛ. Значительное смещение нейтрали может возникнуть при попадании схемы в резонанс в случаях возникновения неполнофазных режимов, например, неполнофазном включении и отключении фаз выключателя линии [3].

В сети с изолированной нейтралью или нейтралью, заземленной через ДГР, зачастую сложно обеспечить правильную работу релейных защит от однофазных замыканий, так как реальный ток однофазного замыкания на землю, протекающий через трансформатор тока нулевой последовательности поврежденного присоединения, зависит от текущего режима (конфигурации) сети, степени расстройки компенсации, характера и вида нагрузки и пр.

#### Применение резистивного и комбинированного заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ

Кардинально решить проблемы перенапряжений при замыканиях на землю через перемежающуюся дугу, феррорезонансных и резонансных явлений, обеспечить сокращение повреждений изоляции высоковольтного оборудования возможно за счет перехода от режима изолированной нейтрали сети к резистивному либо комбинированному (нейтраль заземлена через параллельно включенные дугогасящий реактор и рези-

стор) режиму заземления нейтрали [4–6]. Кроме того, активный ток, создаваемый резистором, позволяет организовать эффективную работу релейной защиты от ОЗЗ, обеспечить требуемую селективность определения поврежденного присоединения, что способствует повышению уровня электробезопасности для людей и животных. Именно такие преимущества, как эффективное ограничение перенапряжений при однофазных замыканиях, резонансных и феррорезонансных явлениях и возможность организации селективной релейной защиты, способствовали широкому распространению в разных странах режима заземления нейтрали через резистор.

В сетях 6–35 кВ для заземления нейтрали могут быть применены либо низкоомные, либо высокоомные резисторы.

Высокоомное резистивное заземление нейтрали или комбинированное заземление нейтрали (при необходимости компенсации емкостного тока ОЗЗ согласно требованиям ПУЭ и ПТЭ) необходимо применять в тех случаях, когда сеть должна иметь возможность длительной работы в режиме ОЗЗ до обнаружения места ОЗЗ и устранения повреждения или имеются ограничения по величине тока в месте повреждения. При этом ток от высокоомного резистора должен быть такой величины, чтобы исключить появление опасных явлений, связанных с перенапряжениями, а также в большинстве случаев быть достаточным для селективного определения поврежденного присоединения.

Заземление нейтрали при использовании высокоомного резистора характеризуется:

- отсутствием перенапряжений высокой кратности при однофазных дуговых замыканиях на землю и мноместных повреждений в сети;
- снижением напряжения смещения нейтрали до уровня, нормируемого Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ (в сети с дугогасящим реактором и высокоомным резистором);
- отсутствием феррорезонансных явлений и повреждений трансформаторов напряжения и другого оборудования;
- возможностью организации селективной токовой защиты от ОЗЗ с действием на сигнал (а при необходимости и на отключение);
- возможностью продолжительной работы сети в режиме ОЗЗ.

Область применения высокоомных резисторов заземления нейтрали: кабельные, воздушные, смешанные сети без резервирования (зачастую с высоким уровнем износа изоляции), сети опасных производственных объектов с большим количеством приводных технологических электродвигателей 6–10 кВ, сети ответственных социальных объектов и другие, в которых отключение питания при ОЗЗ без перевода на другой источник энергопитания недопустимо.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали применяется в случаях, когда поврежденное присоединение при ОЗЗ должно быть обязательно селективно отключено релейной защитой в течение минимально возможного времени. При этом ток, создаваемый низкоомным резистором, достаточен для работы релейной

защиты на отключение однофазного повреждения в любой точке сети.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали характеризуется:

- отсутствием перенапряжений высокой кратности при однофазных дуговых замыканиях на землю (снижение перенапряжений до нижней границы  $1,73U_{ф \max}$  достигается в том числе за счет перевода дуги к устойчивому горению за время до 10 мс);
- отсутствием феррорезонансных явлений и повреждений трансформаторов напряжения;
- возможностью организации простой и эффективной защиты от ОЗЗ с быстрым отключением поврежденного присоединения;
- практически полным исключением возможности перехода однофазного замыкания в многофазное или многоместное;
- уменьшением опасности поражения электрическим током сотрудников и посторонних лиц за счет быстрого отключения замыкания на землю.

Область применения низкоомного резистивного заземления нейтрали:

- сети с достаточным резервированием;
- сети, содержащие кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена;
- сети с повышенными требованиями к электробезопасности с обязательным отключением ОЗЗ.

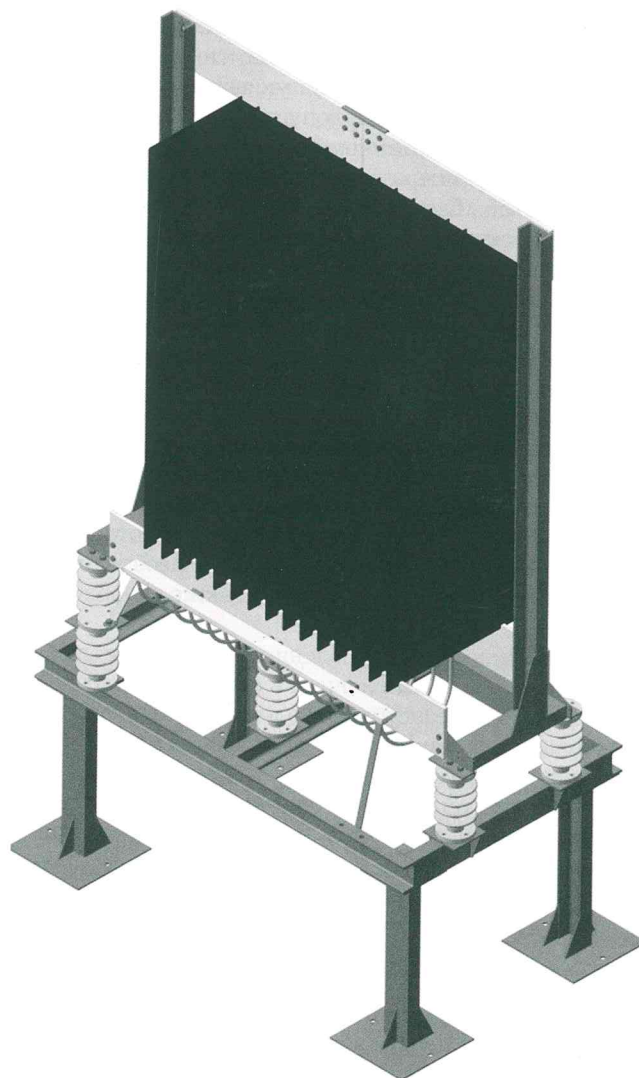
#### Предлагаемое решение

В ООО «Болид» разрабатываются, выпускаются и внедряются на различных электроэнергетических объектах конкурентоспособные и патентозащищенные высоковольтные резисторы различного номинала [7–9]. Особенностью данных резисторов является то, что их резистивная часть изготавливается из композиционного электропроводного материала «ЭКОМ» многофункционального назначения. Этот материал стал основой конструктивных элементов всей номенклатуры выпускаемых изделий: высоковольтных резисторов защитных типа РЗ и РЗ1 для заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ, блочно-модульных нагрузочных устройств для проведения пуско-наладочных работ газотурбинных и газопоршневых электростанций, нагревательных приборов для различных систем обогрева.

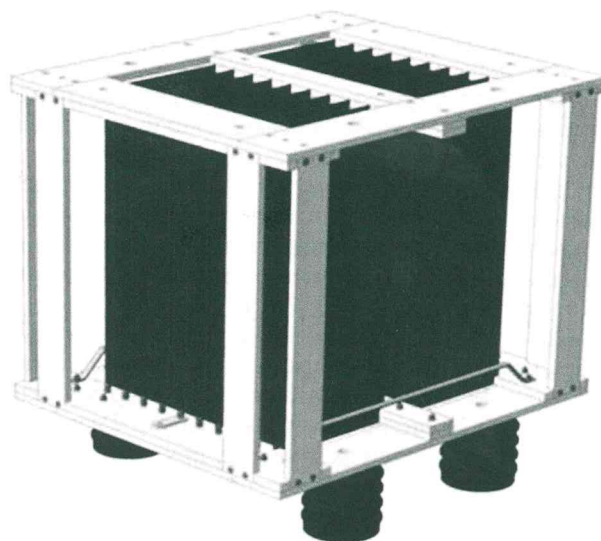
Разработаны унифицированные конструкции блоков резисторов для установки в помещениях ЗРУ, на территории ОРУ, для комплектации ячеек КРУ (рис. 1).

Резисторы для заземления нейтрали аттестованы для применения в сетях ПАО «Россети» и рекомендованы для применения на объектах. В 2011 г. подтверждено соответствие выпускаемых резисторов серий РЗ и РЗ1 принятым международным нормам IEC Std 32.

Нагревание композиционного элемента из материала «ЭКОМ» за счет отрицательного температурного коэффициента ведет не к росту сопротивления, а к некоторому его снижению (до 10 %) при эксплуатационных температурах перегрева 115 °С относительно эффективной температуры окружающей среды 40 °С по ГОСТ 15543.1-89. Таким образом, у резисторов из композиционного материала температура на поверхно-



а



б

**Рис. 1. Унифицированные конструкции блоков резисторов:**

- а** – типа РЗ для установки в помещениях ЗРУ, на территории ОРУ;
- б** – типа РЗ1 для установки в ячейках КРУ

сти элементов в рабочем режиме в несколько раз меньше, чем у металлических аналогов, что удовлетворяет требованиям всех отечественных нормативных документов (ГОСТ, ПУЭ) по допустимым температурам нагрева. Применение композиционных резисторов с предельной температурой токопроводящих элементов менее 155 °С позволяет обеспечить высокую надежность эксплуатации резисторной установки. Преимущества данных резисторов включают простоту, модульное исполнение, удобство в эксплуатации, конкурентную стоимость, протекание тока в резистивном элементе по всему объему материала от одного электрода к другому, большую объемную теплоемкость при одном и том же сопротивлении и равных прочих параметрах, отрицательный температурный коэффициент сопротивления при последовательном соединении элементов, позволяющий равномерно распределять тепловую нагрузку, возможность изготавливать сухие пожаробезопасные изделия без необходимости принудительного охлаждения. Также необходимо отметить:

- возможность изготовления резистора с любым номинальным сопротивлением в зависимости от количества и типа резистивных элементов и способа их соединения для эксплуатации в условиях любой степени загрязнения атмосферы;

- хорошую теплоотдачу благодаря большой площади поверхности элементов и специальным составам покрытий;

- высокую степень защиты оболочки элемента резистора защитного: от IP 54 и выше;

- высокую сейсмостойкость (от 7 баллов по шкале MSK-64 и выше);

- широкий диапазон рабочих температур (–60...+50 °С), позволяющий применять резисторы в климатических зонах от Заполярья до тропиков;

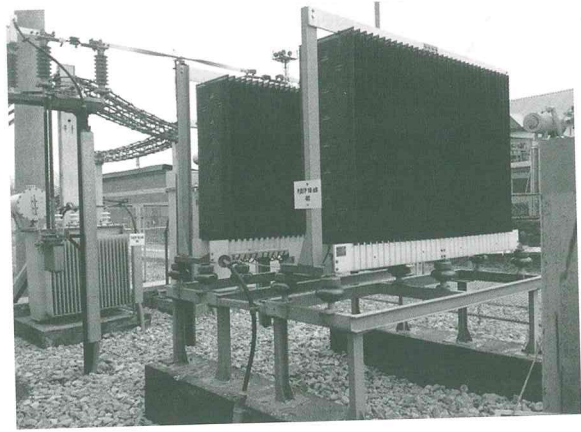
- невысокую температуру на поверхности резистивных элементов в процессе длительной работы: не более 155 °С;

- возможность конверсии резисторов (использование одного и того же резистора в сетях различного напряжения путем комбинирования количества резистивных элементов и способа их подключения);

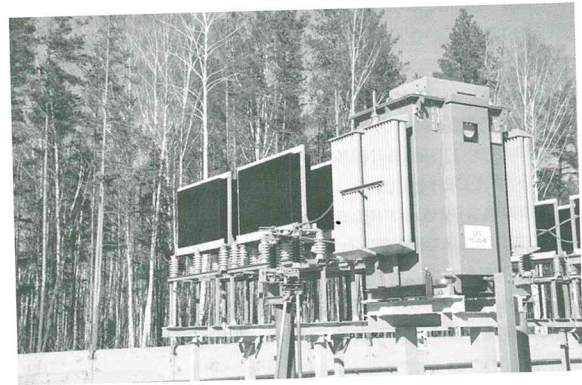
- ремонтпригодность конструкции, возможность замены как функциональных (электрических), так и опорных (механических) элементов.

На рис. 2 приведены резисторы типа РЗ в действующих электрических сетях 6–35 кВ.

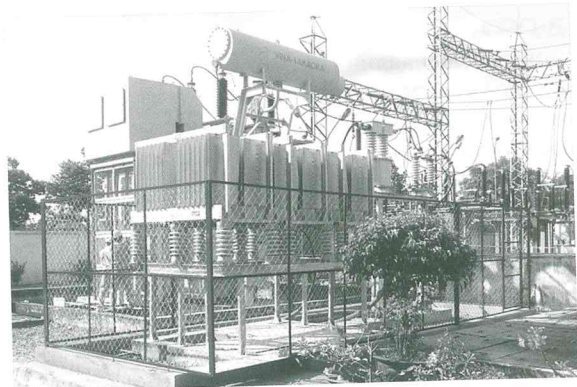
За 25-летний период введено в успешную эксплуатацию более 2700 резисторных установок в России, Украине, Беларуси, Казахстане, Кыргызстане, Узбекистане, Монголии, Вьетнаме, Иране. Резисторы установлены в электрических сетях крупных электростанций, например Калининской АЭС, Белоярской АЭС, Ростовской АЭС, Бушерской АЭС, сетях региональных распределительных компаний, металлургических, целлюлозно-бумажных, нефтехимических, горнорудных комбинатов, угольных разрезов, электрических сетях городов и т. д. Опыт эксплуатации показывает, что установка резистора на шинах собственных нужд электростанции, подстанции предприятия позволяет защитить все двигатели, присоединенные



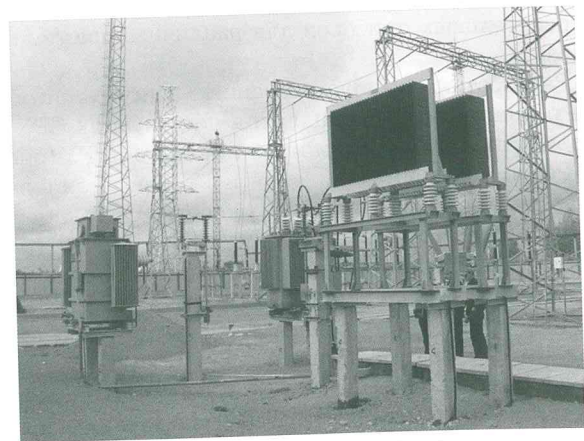
а



б



в



г

**Рис. 2. Резисторы типа РЗ в действующих электрических сетях:**  
а – сеть 10 кВ; б – сеть 20 кВ;  
в – сеть 22 кВ, Вьетнам; г – сеть 35 кВ

к шинам, увеличить срок службы и надежность работы электрооборудования (повреждаемость снижается в среднем в 4–6 раз), уменьшить недоотпуск электроэнергии потребителям, значительно снизить экономический ущерб от простоя и недовыпуска продукции. Срок окупаемости резистивной установки составляет 3–5 лет в зависимости от специфики предприятия.

Таким образом, выбор режима заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ является исключительно важным вопросом при проектировании и модернизации. От корректного выбора режима заземления нейтрали зависят уровень аварийности в сети, правильная работа защит от замыканий на землю, автоматизация поиска поврежденного фидера и последствия развития однофазных замыканий на землю. Подтвержден положительный опыт эксплуатации

резисторов заземления нейтрали ООО «Болид» в сетях 6–35 кВ различного назначения: в схемах выдачи мощности и собственных нужд электростанций, на распределительных подстанциях различного уровня, в том числе в сетях электроснабжения промышленных предприятий и объектов городской инфраструктуры. После установки резисторов в нейтраль наблюдается заметное снижение повреждаемости ответственного оборудования сети. Применение в сетях 6–35 кВ предлагаемых резисторов позволяет существенно повысить надежность работы сетей, автоматизировать процесс поиска поврежденного фидера и снизить аварийность при однофазных замыканиях на землю в 4–6 раз. Переход к резистивному либо комбинированному заземлению нейтрали является технически и экономически обоснованным для применения при реконструкции и развитии сетей среднего класса напряжения.

### Литература

1. Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Рейхердт А. А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 368 с.
2. Гиндуллин Ф. А., Гольдштейн В. Г., Дульзон А. А., Халилов Ф. Х. Перенапряжения в электрических сетях 6–35 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 190 с.
3. Халилов Ф. Х., Евдокунин Г. А., Поляков В. С. и др. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений. – СПб.: Петербургский энергетический институт повышения квалификации Министерства топлива и энергетики Российской Федерации, 1997. – 216 с.
4. Емельянов Н. И., Ильиных М. В., Сарин Л. И. Средства и методы ограничения внутренних перенапряжений в сетях 6–35 кВ // Энергетик. – 2011. – № 10. – С. 6–10.
5. Ильиных М. В., Сарин Л. И. Комплексный подход к выбору средств ограничения перенапряжений в сетях 6–10 кВ крупных промышленных предприятий целлюлозно-бумажной и металлургической промышленности // Электрические сети и системы. – 2008. – № 4. – С. 16–26.
6. Емельянов Н. И., Ширковец А. И. Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ // Энергоэксперт. – 2010. – № 2. – С. 44–50.
7. Ильиных М. В., Сарин Л. И., Ширковец А. И. Опыт эксплуатации высоковольтных резисторов типа РЗ в сетях средних классов напряжения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – Спецвыпуск № 1. – С. 65–68.
8. Сарин Л. И., Ширковец А. И., Ильиных М. В. Опыт применения резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ // Энергетик. – 2009. – № 4. – С. 13–14.
9. Васильева А. Ю., Павкина Е. М. Высоковольтные резисторы для сетей 3–35 кВ // Энергетик. – 2011. – № 10. – С. 10–13.

### Applications of neutral grounding resistors to improve reliability and electrical safety of 6–35 kV power grids

**M. V. Ilinykh,**  
Bolid LLC, Novosibirsk, Russia, Head of the Research & Development Department

**N. I. Emelyanov,**  
Bolid LLC, Novosibirsk, Russia, Deputy Director, PhD., associate professor

**L. I. Sarin,**  
Bolid LLC, Novosibirsk, Russia, Director

*Neutral grounding systems are crucial for 6–35 kV power grids. Isolated neutral grounding or arc suppression reactor neutral grounding, commonly used in distribution grids, do not improve safety and reliability of power supply due to single-phase-to-ground faults, overloads, inefficient selective breaking, etc. Resistance neutral grounding and combined neutral grounding solutions can help eliminate the above-mentioned problems. This paper focuses on recommended practices for planning, design, and coordination of power systems, when it is desired to install neutral grounding resistors. The authors analyze the worldwide experience of using resistance and combined neutral grounding in 6–35 kV power grids as well as applications of low resistance and high resistance grounding. The patented neutral grounding resistors are presented along with summarized results of their successful operation in distribution grids.*

**Keywords:** electrical safety, neutral grounding, overvoltage, single-phase-to-ground fault, neutral grounding resistor.