

УДК 621.311

**РЕЗИСТИВНО ЗАЗЕМЛЁННАЯ НЕЙТРАЛЬ В ВОЗДУШНЫХ И КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ**  
**RESISTIVELY GROUNDED NEUTRAL IN OVERHEAD AND CABLE NETWORKS**

М.В. Уласевич, А.С. Мисуно

Научный руководитель – А.Г. Губанович, к.т.н., доцент

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Республика Беларусь

power.st@bntu.by

M. Ylasevich, A. Misuno

Supervisor – A. Gubanovich, Associate Professor

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** Метод резистивного заземления подтверждён мировым опытом как надёжное решение для современных сетей среднего напряжения, подверженных однофазным замыканиям на землю (ОЗЗ). Низкоомное заземление обеспечивает быстрое отключение повреждённых участков, снижение перенапряжений и высокую электробезопасность. Высокоомное заземление допускает длительную работу сети с ОЗЗ, подавляет феррорезонансные процессы и способно гасить дугу самостоятельно.

**Abstract:** The resistive grounding method has been confirmed by international experience as a reliable solution for modern medium-voltage networks subject to single-phase earth faults. Low-resistance grounding ensures quick disconnection of damaged areas, reduced overvoltage and high electrical safety. High-resistance grounding allows long-term operation of the network with an single-phase earth faults, suppresses ferroresonance processes and is able to extinguish the arc independently.

**Ключевые слова:** однофазное замыкание на землю, резистивное заземление нейтрали, низкоомное заземление, высокоомное заземление, релейная защита, феррорезонансные процессы.

**Keywords:** single-phase earth fault, resistive neutral grounding, low-resistance grounding, high-resistance grounding, relay protection, ferroresonance processes.

### **Введение**

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) представляют собой наиболее распространённый тип аварий в распределительных сетях среднего напряжения (6–35 кВ). Возникновение ОЗЗ сопровождается дуговыми перенапряжениями, которые могут достигать 6–8 кратных значений от номинального напряжения. По статистике, на их долю приходится до 80% всех аварийных отключений. Такие повреждения сопровождаются появлением опасных перенапряжений, феррорезонансных процессов, а также могут вызывать пробой изоляции электрических машин. Отсутствие своевременного устранения ОЗЗ значительно увеличивает риск пожаров и повреждений электрооборудования. Это ведёт к большим финансовым потерям. В условиях постоянного роста энергопотребления и увеличения в сетях доли кабельных линий с высокими ёмкостными токами проблема эффек-

тивной защиты от ОЗЗ становится ещё более актуальной. Анализ эксплуатационных данных показывает, что в сетях с низкоомным заземлением нейтрали, регулярность перехода однофазного замыкания на землю в междофазные короткие замыкания снижается порядка на 60-70% в сравнении с традиционными системами с изолированной нейтралью.

Одним из эффективных методов повышения надёжности работы электрических сетей и защиты от ОЗЗ является резистивное заземление нейтрали. Целью данной работы является анализ режимов резистивного заземления, их особенностей, преимуществ и недостатков, а также рассмотрение возможных схем реализации в воздушных сетях 6–35 кВ.

### **Основная часть**

При ОЗЗ в сети с резистивным заземлением нейтрали через все присоединения проходят собственные ёмкостные токи, а в повреждённой линии – дополнительный активный ток, создаваемый резистором. Это позволяет эффективно решать такие задачи как:

- селективно определить повреждённый участок сети и сразу принять меры по устранению повреждения;
- существенно снизить уровень дуговых перенапряжений и исключить феррорезонансные явления.

Эксплуатация резистивного заземления нейтрали сети позволяет снизить уровень перенапряжений и создаёт предпосылки для построения и точной настройки релейной защиты от ОЗЗ. Резистивное заземление нейтрали положительно влияет на надёжность оборудования и повышает также безопасность для людей и животных, которые могут оказаться в зоне падения провода воздушной ЛЭП.

В зависимости от величины сопротивления резистора, времени его работы различают два режима: низкоомное и высокоомное заземления.

Низкоомное заземление характеризуется ограниченным временем действия резистора. Сопротивление выбирается таким образом, чтобы обеспечить достаточный ток для срабатывания релейной защиты и для селективного отключения поврежденного элемента сети.

К достоинствам низкоомного резистивного заземления следует отнести следующие факторы:

- обеспечивает быстрое и избирательное отключение дефектного элемента, что уменьшает зону воздействия повреждения;
- благодаря высокой скорости срабатывания предотвращает переход из однофазного замыкания(ОЗЗ) в сложные виды КЗ, такие как двойное кз на землю или междофазное короткое замыкание;
- сокращается продолжительность воздействия повышенного напряжения на изоляцию неповреждённых фаз, что существенно снижает риск её пробоя и продлевает срок эксплуатации оборудования;
- резистивное заземление минимизирует возникновение дуговых перенапряжений, повышая общую устойчивость сети к аварийным режимам, что существенно увеличивает надёжность защиты.

Однако, также выделяются такие недостатки как:

- требуются дополнительные инвестиции в монтаж и обслуживание резистивного заземления нейтрали, это увеличивает расходы;
- сеть не может длительно функционировать в режиме ОЗЗ тока КЗ в некоторых случаях может привести к более масштабным повреждениям оборудования;
- повышается количество срабатываний защитных устройств, что усиливает нагрузку на коммутационные аппараты и может влиять на бесперебойность электроснабжения.

При высокоомном заземлении резистор может оставаться включённым длительное время, пока не будет устранено повреждение. В таком режиме резистор эксплуатируется до тех пор, пока обслуживающий персонал не выявит поврежденный элемент или соберет временную схему электроснабжения потребителей.

При правильном выборе сопротивления заземляющего резистора эффект накопления зарядов на фазах сети при дуговом перемежающемся ОЗЗ сводится к минимуму, и перенапряжения на неповрежденных фазах при повторных зажиганияах дуги не превышают значений  $(2,4 - 2,5) U_{\text{фном}}$ .

К преимуществам высокоомного заземления нейтрали относятся:

- данная система эффективно подавляет нежелательные резонансные явления, тем самым повышая стабильность работы электрической системы;
- при малых значениях тока ОЗЗ в зоне повреждения обеспечивается самогашение электрической дуги, что способствует самостоятельной ликвидации части замыканий;
- практически полностью исключается возникновение нестабильных дуговых ОЗЗ, снижая вероятность повторных аварийных ситуаций;
- уменьшение амплитуды перенапряжений позволяет реализовать селективное отключение повреждённого участка без значительных колебаний параметров сети.

К недостаткам относятся:

- требуется установка резистивного заземления нейтрали, что увеличивает капитальные и эксплуатационные расходы;
- усиление тока в месте повреждения может спровоцировать прерывистые дуговые ОЗЗ, усложняющие локализацию аварии;
- в переходных режимах неповрежденных фаз возникают кратковременные перенапряжения, которые могут достигать 2,5 номинального фазного напряжения;
- превышение напряжения увеличивают риск вторичных пробоев в элементах с повреждённой изоляцией;
- существуют технические ограничения по допустимой суммарной емкостной составляющей тока, что затрудняет масштабирование системы.

Комбинированное заземление включает высокоомный резистор присоединённый параллельно дутогасящему реактору. Такой подход позволяет минимизировать ошибки, возникающие при настройке реактора и значительно повышает эффективность защитных устройств.

На практике для сетей среднего напряжения с резервированием рекомендуется применение низкоомного заземления. Оно обеспечивает:

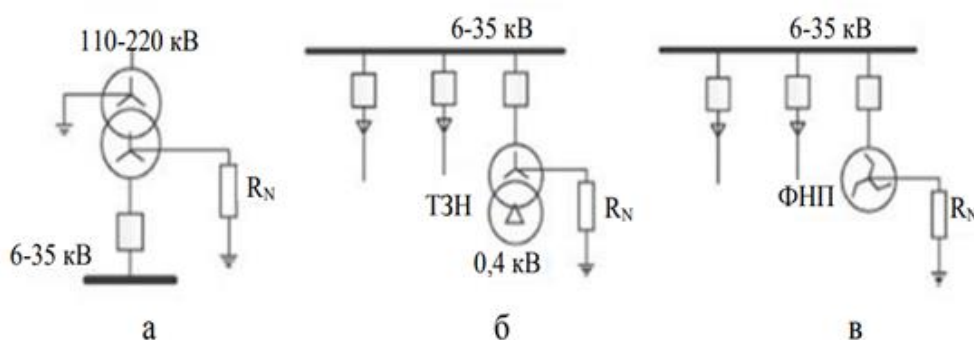
- ограничение перенапряжений;
- высокую электробезопасность;
- устойчивую работу релейной защиты.

Высокоомное заземление в таких условиях может привести к росту токов ОЗЗ на 40% и, при длительной работе резистора, к снижению электробезопасности по сравнению с изолированной нейтралью.

Если рассматривать возможность заземления нейтрали в смешанной сети, то предпочтение можно отдать также низкоомному заземлению нейтрали.

В современных электрических сетях применяются три основные схемы подключения резисторов:

1. В нейтраль силового трансформатора 220 (110)/10 кВ (рис. 1, а);
2. Через нейтраль специального трансформатора заземления нейтрали (ТЗН) (рис. 1, б);
3. Через фильтр нулевой последовательности (ФНП) с zigzag-образной схемой (рис. 1, в).



а – нейтрали обмотки силового трансформатора; б – ТЗН; в – ФНП со схемой «zigzag»

Рисунок 1 – Схемы подключения резистора в сети 10 кВ

Схема нейтрали обмотки силового трансформатора (рис. 1, а) – наиболее простой вариант, однако при этом имеет недостаток: при отключении питающего трансформатора теряется резистивное заземление секции шин. Этот недостаток отсутствует у схемы (рис. 1, б, в);

В схеме присоединения через нейтраль ТЗН (рис. 1, б) исключается воздействие переходных процессов, возникающих при несимметричном КЗ в сети 110 кВ на 10 кВ. Сравнение подключения схем резисторов выявило, что гибридные системы с комбинацией ТЗН и адаптивным управлением сопротивлением повышают селективность защиты примерно на 25-30%.

Схема (рис. 1, в) аналогична варианту с ТЗН, обладает высокой стабильностью и надёжностью. Интеграция резисторов через фильтр нулевой последовательности показывает повышенную устойчивость к переходным процессам, что особенно актуально для сетей с распределённой генерацией.

Сравнительный анализ показывает, что схемы с использованием ТЗН или ФНП позволяют снизить перенапряжения до  $3,6 U_{\phi}$ , что на 22% ниже, чем в схеме с силовым трансформатором.

## Заключение

Резистивное заземление нейтрали представляет собой эффективное техническое решение для повышения надёжности и электробезопасности сетей 6–35 кВ. Наиболее целесообразным в условиях распределительных воздушных сетей является применение низкоомного заземления особенно для кабельных сетей. Несмотря на дополнительные затраты на оборудование и монтаж, данный подход обеспечивает высокую эффективность работы релейной защиты и способно значительно снизить риски аварий, повреждений оборудования, токоведущих и повысить безопасность персонала. Высокоомное заземление, хоть и позволяет сохранить работоспособность сети при ОЗЗ, однако при этом сопровождается рисками роста токов повреждений и перенапряжений, что обуславливает его применение для воздушных сетей. Если сравнивать схемы подключения резисторов, то варианты с ТЗН и ФНП обеспечивают повышенную стабильность, что делает их более предпочтительными в использовании. Резистивное заземление является общепринятой и надёжной практикой в системах электроснабжения.

### Литература

1. Лазаревич, И. А. Особенности работы РЗА в сетях с резистивно заземленной нейтралью / И. А. Лазаревич ; науч. рук. Е. А. Дерюгина // Актуальные проблемы энергетики 2018 [Электронный ресурс] : материалы студенческой научно-технической конференции / сост.: И. Н. Прокопья, Т. А. Петровская. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 435-436. (дата обращения: 30.04.2025).
2. Лоскутов А.А., Кузина О.В. Анализ применения резистивного заземления нейтрали в распределительных электрических сетях на основе имитационного моделирования. – Нижний Новгород: НГТУ, 2019. – 61 с.
3. Охременко, А. Ю. Резистивное заземление нейтрали воздушной электрической сети напряжением 10-35 кВ / А. Ю. Охременко // Наука - образованию, производству, экономике : материалы Третьей международной научно-технической конференции : в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Б. М. Хрусталева, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск : БНТУ, 2006. – Т. 1. – С. 13-15.
4. Евдокунин Г. А., Гудилин С. В., Корепанов А. А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6 – 10 кВ // Электричество, 1998.