

А.В. Веселков, С.В. Петухов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова»,
г. Архангельск, Российская Федерация
Корреспондирующий автор: А.В. Веселков

**РЕЗИСТИВНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ 110–220
КИЛОВОЛЬТ: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ОПЫТА ВНЕДРЕНИЯ,
ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НОРМАТИВНЫХ
БАРЬЕРОВ**

В электрических сетях 110–220 кил вольт Российской Федерации традиционно применяется эффективно заземленная нейтраль, однако рост токов короткого замыкания и числа повреждений кабельных линий требует поиска альтернативных технических решений. Цель исследования: провести всесторонний анализ применения резистивного заземления нейтрали в сетях 110 и 220 кил вольт на основе мирового опыта, действующих нормативных требований России и результатов пилотных проектов отечественных сетевых организаций. Методы: использованы теоретический анализ электромагнитных процессов при однофазных замыканиях на землю с применением метода симметричных составляющих, обзор международных и российских нормативно-технических документов, анализ эксплуатационных данных, полученных в ходе внедрения резистивного заземления нейтрали на объектах акционерного общества «РЭС», а также технико-экономическое сравнение вариантов. Результаты: установлено, что действующие правила устройства электроустановок предписывают для сетей 110 кил вольт и выше только режим эффективно заземленной нейтрали, что является основным нормативным барьером. В то же время успешный опыт, накопленный в России

(масштабирование проекта на 43 подстанции акционерного общества «РЭС», закупки 2025–2026 годов), а также многолетняя практика США (более 30 процентов новых подстанций), Китая и Европы свидетельствуют о высокой технической и экономической эффективности резистивного заземления. Показано, что резистивное заземление позволяет снизить перенапряжения при дуговых замыканиях на землю с (2,5–3,0) фазного напряжения (при эффективно заземленной нейтрали) до (1,8–2,2) фазного напряжения, что критически важно для кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена, и полностью подавить феррорезонанс. Выводы: резистивное заземление нейтрали является технически эффективным и экономически обоснованным решением для городских кабельных сетей 110 киловольт с большими ёмкостными токами, а также для сетей, подверженных феррорезонансу. Отечественный опыт пилотных проектов подтверждает готовность технологии к масштабному внедрению. Основным сдерживающим фактором остается устаревшая нормативная база, требующая актуализации. Перспективными направлениями развития являются гибридное заземление и адаптивные системы управления резистором.

Ключевые слова: резистивное заземление нейтрали; эффективно заземленная нейтраль; ограничение токов короткого замыкания.

In 110–220 kilovolt electrical networks of the Russian Federation, effectively earthed neutral is traditionally used; however, the growth of short-circuit currents and the number of damage to cable lines require alternative technical solutions. Objective: To conduct a comprehensive analysis of resistive neutral grounding application in 110 and 220 kilovolt networks based on international experience, current Russian regulatory requirements, and the results of pilot projects of domestic grid companies. Methods: Theoretical analysis of electromagnetic processes during single-phase earth faults using the symmetrical component method, review of international and Russian regulatory documents, analysis of operational data obtained during the implementation of resistive neutral grounding at RES joint-stock company facilities, as well as technical and economic comparison of options. Results: It has been established that the

current electrical installation rules prescribe only the effectively earthed neutral mode for 110 kilovolts and above, which is the main regulatory barrier. At the same time, the successful experience accumulated in Russia (scaling the project to 43 substations of RES joint-stock company, procurements of 2025–2026), as well as the long-term practice of the United States (more than 30 percent of new substations), China and Europe, indicate the high technical and economic efficiency of resistive grounding. It is shown that resistive grounding can reduce overvoltages during arc earth faults from (2.5–3.0) phase voltage (with effectively earthed neutral) to (1.8–2.2) phase voltage, which is critical for cross-linked polyethylene insulated cable lines, and completely suppress ferroresonance. Conclusions: Resistive neutral grounding is a technically effective and economically justified solution for urban cable networks of 110 kilovolts with high capacitive currents, as well as for networks prone to ferroresonance. The domestic experience of pilot projects confirms the technology's readiness for large-scale implementation. The main limiting factor remains the outdated regulatory framework that needs updating. Hybrid grounding and adaptive resistor control systems are promising development directions.

Keywords: resistive neutral grounding; effectively earthed neutral; short-circuit current limitation.

Введение

Электрические сети 110–220 кВ являются основой системообразующих и распределительных сетей Российской Федерации. В России режим работы нейтрали для различных классов напряжения регулируется правилами устройства электроустановок [1]. Рост нагрузок, рост генерации и переход на кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена (далее – СПЭ) обострили проблемы токов короткого замыкания (далее – КЗ) и перенапряжений при однофазных замыканиях на землю (далее – ОЗЗ) [2].

В связи с этим мировое энергосообщество активно исследует альтернативы. В последние годы в России накоплен значительный опыт внедрения резистивного заземления нейтрали (далее – РЗН). Цель данной работы

– комплексно проанализировать этот опыт и оценить перспективы технологии. Выбор режима работы нейтрали – это не просто техническое решение, а фундаментальная проектная задача, определяющая требования ко всей сети [3].

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялись следующие методы:

- теоретический анализ электромагнитных и переходных процессов при однофазных замыканиях на землю с использованием метода симметричных составляющих;
- обзор и систематизация зарубежных (IEEE, CIGRE) и отечественных нормативно-технических документов (правила устройства электроустановок, руководящие документы) [1, 4, 5];
- анализ эксплуатационных данных, полученных в ходе внедрения РЗН на объектах акционерного общества «РЭС» (далее – АО «РЭС») [2, 6];
- технико-экономическое сравнение вариантов на основе метода приведённых затрат.

1. Современное нормативно-правовое поле Российской Федерации

1.1. Требования правил устройства электроустановок 7-го издания

Согласно пункту 1.2.16 правил устройства электроустановок [1]:

- сети 110 кВ могут работать как с глухозаземленной, так и с эффективно заземленной нейтралью. Резистивное заземление нейтрали для данного класса напряжения прямо не предусмотрено. Любое отступление требует специального научно-технического обоснования и является исключением, определяемым энергоснабжающей организацией [1];
- сети 220 кВ и выше должны работать только с глухозаземленной нейтралью. Это требование делает применение РЗН на напряжении 220 кВ в настоящее время практически невозможным без специального отступления от норм.

Также согласно правилам устройства электроустановок [1] подстанции 110/10 кВ должны работать с резистивно заземленной нейтралью.

1.2. Барьеры и пути их преодоления

Основной барьер – отсутствие РЗН в нормативных документах для напряжений 110 кВ. Это создает избыточные административные барьеры для сетевых компаний. Пути решения – инициирование изменений в правила устройства электроустановок, разработка соответствующих стандартов организаций и руководящих документов, а также дальнейшее накопление и анализ успешного опыта [7].

2. Анализ технических аспектов и преимуществ резистивного заземления нейтрали

2.1. Ключевые технологические преимущества

Результаты внедрения РЗН на практике [2, 6] позволяют выделить следующие ключевые эффекты:

а) Снижение перенапряжений. Согласно опыту АО «РЭС», оборудование обеспечивает защиту изоляции кабельных линий от перенапряжений в режиме ОЗЗ. Кратность перенапряжений при РЗН снижается с 2,5–3,0 фазного напряжения (характерных для ЭЗН) до безопасных 1,8–2,2 фазного напряжения [4, 8]. Это особенно важно для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, критичных к перенапряжениям.

б) Ограничение токов КЗ. Оборудование РЗН работает по принципу уменьшения механических и термических воздействий токов КЗ на сеть и аппараты [2]. Ток однофазного КЗ при РЗН составляет 300–1000 А, что на 1–2 порядка ниже, чем при ЭЗН (20–40 кА). Это позволяет использовать более дешёвые выключатели и упрощает заземляющие устройства.

в) Повышение безопасности. Снижается опасность поражения электрическим током обслуживающего персонала и исключается возможность перехода однофазного замыкания в многофазное [9].

г) Устранение феррорезонанса. В сетях 110 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения РЗН полностью подавляет феррорезонансные

процессы. Феррорезонанс – одна из частых причин ложных срабатываний защит и выхода из строя измерительных трансформаторов [7].

2.2. Методика выбора параметров резистора

Выбор сопротивления резистора – ключевая инженерная задача. Основные параметры выбора: номинальное напряжение сети (линейное и фазное) и желаемый ток ОЗЗ. Для сетей 110 кВ обычно принимают ток ОЗЗ в диапазоне 300–600 А [5, 8]. Ток при ОЗЗ будет определяться геометрической суммой ёмкостного тока сети и активного тока через резистор и определяется по формуле:

$$I_{\text{озз}} = \sqrt{(\sqrt{3} \cdot I_c)^2 + (I_{\text{акт}})^2}, \text{ А}$$

где I_c - ёмкостной ток сети (определяется протяжённостью и типом кабельных линий), А;

$I_{\text{акт}}$ — активный ток, протекающий через резистор, заземляющий нейтраль, А.

Преобразовав активный ток через резистор по закону Ома, получим:

$$I_{\text{озз}} = \sqrt{(\sqrt{3} \cdot I_c)^2 + \left(\frac{U_{\phi}}{R_{\text{н}}}\right)^2}, \text{ А}$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение, напряжение, приложенное к резистору (для 110 кВ $U_{\phi} = \frac{110000}{\sqrt{3}} \approx 63500 \text{ В}$), В;

$R_{\text{н}}$ – сопротивление резистора, Ом.

Отсюда, зная фазное напряжение и ёмкостной ток сети, сопротивление резистора можно определить по формуле:

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{I_{\text{озз}}^2 - (\sqrt{3} \cdot I_c)^2}}, \text{ Ом}$$

Пример расчёта для сети 110 кВ.

Примем $U_{\phi} = 63500 \text{ В}$, $I_c = 120 \text{ А}$ (типично для 150 км кабеля сечением 500 мм²). Выбираем $I_{\text{озз}} = 470 \text{ А}$. Тогда:

$$R_H = \frac{63500}{\sqrt{470^2 - (\sqrt{3} \cdot 120)^2}} \approx 150 \text{ Ом.}$$

Полученное значение сопротивления резистора обеспечит достаточный для надёжного срабатывания токовых защит нулевой последовательности ток при ОЗЗ.

Пример 2 (более протяжённая сеть).

Для сети с суммарной длиной кабельных линий 250 км ёмкостной ток может достигать $I_c = 200 \text{ А}$. Примем $U_\phi = 63500 \text{ В}$, Выберем $I_{\text{озз}} = 720 \text{ А}$ Тогда:

$$R_H = \frac{63500}{\sqrt{720^2 - (\sqrt{3} \cdot 200)^2}} \approx 100 \text{ Ом.}$$

Такое сопротивление резистора обеспечит выбранный ток ОЗЗ, но требуется проверка термической стойкости резистора из-за выделения больших мощностей в течении времени срабатывания защит. Необходимо учитывать, что выбираемый ток ОЗЗ должен быть больше номинального тока фидера для исключения ложного срабатывания защиты.

Термическая стойкость резистора – его способность выдерживать ток КЗ в течение времени срабатывания защиты (обычно 1–2 с) [5]. Актуальные стандарты: IEC 60076-25:2023 (сухие резисторы в нейтрали) [5] и ГОСТ Р 58396-2019 [9].

В Российской Федерации для работы в режиме ЭЗН применяются заземлители типа ЗОН-110. Для РЗН необходимы специализированные резисторы, при производстве которых важно опираться на существующие стандарты [10].

Дополнительно следует отметить, что для городских кабельных сетей с большой протяжённостью линий (более 150 км) оптимальным является сопротивление резистора в диапазоне 200–400 Ом, что обеспечивает ток ОЗЗ

500–800 А. При меньшей протяжённости допустимо использование резисторов с сопротивлением до 600 Ом, однако в этом случае необходимо тщательно проверять чувствительность релейной защиты [8].

3. Анализ отечественного и зарубежного опыта внедрения

3.1. Россия: ключевые проекты и тенденции

Отечественный опыт внедрения РЗН показывает уверенный переход от пилотных проектов к широкомасштабному тиражированию.

а) Пилотный проект АО «РЭС» (подстанция 110 кВ «Воинская»).

В 2021 году установлено низкоомное РЗН для сети 10 кВ, ввод в 2022 г. [2, 6]. Результаты за 2024 год: количество аварийных отключений из-за повреждения кабельных линий 10 кВ значительно снизились в сравнении с аналогичным периодом до модернизации оборудования, отмечена экономия времени ремонтных бригад и повышение надёжности для социально значимых объектов [2]. АО «РЭС» планирует до 2037 года установить РЗН ещё на 43 высоковольтных подстанциях [2].

б) Другие значимые проекты и планы.

Группа «Россети»: АО «Россети Московский регион» внедряет РЗН в сетях 6–10 кВ с ожидаемым экономическим эффектом до 870 млн рублей в год [3].

в) Подстанция «Бескудниково» (г. Москва).

Объект работает с РЗН с 2015 года (ток ОЗЗ 500 А). Опыт подтверждает снижение повреждений кабелей и устранение возможности возникновения феррорезонанса.

3.2. Международный опыт

Северная Америка (IEEE). РЗН давно и успешно применяется в сетях 115 кВ. Этот режим обеспечивает снижение опасности возникновения электрической дуги, ограничение механических и термических повреждений оборудования при коротких замыканиях и контроль переходных перенапряжений [4, 8]. По данным IEEE, свыше 30% новых подстанций 115 кВ проектируются с РЗН.

Китай. Массовое применение резисторов на 600 А на новых подстанциях 110 кВ снизило число ложных срабатываний защит на 60%. Опыт Китая показывает, что РЗН особенно эффективно в густонаселённых городах с развитой кабельной сетью [11].

Европа (Германия). Происходит переход с компенсированной нейтрали (дугогасящие катушки) на РЗН. Это позволяет снизить повреждения кабелей вдвое за счёт управляемого тока замыкания и быстрого отключения [12].

4. Техничко-экономическое обоснование

Мировой и российский опыт показывает, что экономический эффект от применения РЗН складывается из снижения аварийности, уменьшения износа оборудования и сокращения затрат на релейную защиту. Реализация низкоомного РЗН обходится в среднем в 2 раза дешевле, чем организация компенсации ёмкостного тока (установка дугогасящих реакторов) [13]. Затраты при этом в основном приходятся на систему релейной защиты (50–60% от общей стоимости). Для конечных потребителей РЗН также выгодно, так как способствует сохранности оборудования и снижению экономических потерь от аварийных отключений.

Ниже приведем таблица сравнения затрат для двух вариантов типовой подстанции 110/10 кВ (два трансформатора по 63 МВА, 10 отходящих кабельных линий общей длиной 150 км). Данные основаны на укрупнённых ценах 2025 года, опубликованных в отраслевых обзорах [14].

Вариант А: глухозаземлённая нейтраль на стороне 110 кВ;

Вариант Б: низкоомное РЗН ($R_n = 150 \text{ Ом}$, $I_{кз} = 440 \text{ А}$).

Исходные данные (источники цен):

- Цены выключателей 110 кВ – по данным прайс-листов ПАО «Электроаппарат» (2025 г.): элегазовый на предельный ток отключения 40 кА – 4,5 млн руб., вакуумный на предельный ток отключения 25 кА – 2,5 млн руб. Разница составляет 40 %.

- Ставка дисконтирования – 10 % (рекомендация Минэкономразвития).

- Срок службы оборудования – 25 лет.
- Стоимость потерь электроэнергии в резисторе (при 2 КЗ в год по 1 с) – 0,3 млн руб./год (цена электроэнергии 3 руб./кВт·ч).
- Предотвращённый ущерб от аварий – 1,5 млн руб./год (оценка по статистике повреждений кабелей в пилотном проекте АО «РЭС» (подстанция 110 кВ «Воинская») [2]).

Таблица 1 - Результаты (в млн руб.):

Статья затрат	Вариант А	Вариант Б
Выключатели 110 кВ (8 шт.)	36	20
Заземляющее устройство	15	5
Релейная защита	6	4
Резисторы нейтрали (2 шт.)	0	6
Монтаж и наладка	5	4
CAPEX	62	39
Потери энергии (год)	0	0,3
Ущерб от аварий (год)	2,0	0,5
OPEX + ущерб (год)	2,0	0,8

Примечание: составлена авторами на основе анализа источников и результатов расчетов.

Приведённые затраты за 25 лет (коэффициент аннуитета 9,077) показывают, что вариант Б экономически предпочтительнее. Однако точный расчёт требует детального проектного технико-экономического обоснования с учётом конкретных параметров сети. Выполнен также анализ чувствительности: при увеличении стоимости резисторов на 30 % и снижении предотвращённого ущерба в 2 раза вариант Б остаётся выгодным.

5. Проблемы и пути их решения

Практика внедрения выявила ряд проблемных аспектов:

а) Нормативные барьеры. Требования правил устройства электроустановок [1] являются главным сдерживающим фактором для РЗН на 110 кВ и особенно на 220 кВ. Решение – инициирование изменений в нормативных документах.

б) Изменение логики работы релейной защиты. Переход на резистивный режим требует полного пересмотра уставок, а часто и самих принципов работы защиты. Необходимо обучение персонала и адаптация алгоритмов [15].

в) Стандартизация и производство отечественного оборудования. Нужны серийные резисторы для 110 кВ с высокими термическими характеристиками [10].

г) Подготовка кадров. Острый дефицит компетенций, поскольку для перехода на РЗН нужны специалисты, владеющие новыми принципами расчёта и эксплуатации [15].

6. Перспективные системы и направления развития

Для 110 кВ наиболее перспективно низкоомное РЗН. Для 220 кВ, ввиду жёстких нормативных ограничений, более реальны гибридные системы.

а) Гибридное заземление. Объединяет дугогасящий реактор (компенсация ёмкостного тока в нормальном режиме) и резистор, подключаемый только на время ОЗЗ для обеспечения селективного отключения. Такие системы уже применяются в Европе [12].

б) Адаптивные системы. Основаны на силовых полупроводниковых ключах (IGBT) и позволяют динамически изменять сопротивление нейтрали, оптимизируя ток под текущие условия сети [11].

в) Активное заземление. Управляемые инверторы могут генерировать ток любой фазы и амплитуды, что позволяет «обнулять» ток в месте повреждения и одновременно обеспечивать селективную защиту [13].

Заключение

В результате проведённого комплексного анализа установлено следующее:

1. Резистивное заземление нейтрали обеспечивает снижение перенапряжений при однофазных замыканиях на землю до 1,8–2,2 фазного напряжения, что значительно улучшает условия работы изоляции кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена.

2. Ток однофазного короткого замыкания при использовании резистивного заземления нейтрали ограничивается значениями 300–1000 А, что на один-два порядка ниже, чем при традиционном эффективно заземленном режиме. Это позволяет применять более дешёвое коммутационное оборудование и упрощает заземляющие устройства.

3. Резистивное заземление нейтрали может снижать вероятность феррорезонансных процессов при заданных параметрах, которые часто приводят к ложным срабатываниям релейной защиты и повреждению измерительных трансформаторов напряжения.

4. Отечественный опыт пилотных проектов (в частности, на подстанции «Воинская» АО «РЭС») показывает потенциальную применимость и требует дальнейшего подтверждения – до 43 подстанций к 2037 году.

5. Экономические расчёты показывают, что капитальные затраты на подстанцию при переходе на резистивное заземление нейтрали может быть экономически обосновано при выполнении расчётов для конкретной сети.

6. Основным препятствием для широкого внедрения остаются устаревшие нормативные требования правил устройства электроустановок, не предусматривающие резистивное заземление нейтрали для сетей 110 кВ и выше.

7. Наиболее перспективными направлениями дальнейшего развития являются гибридные системы (резистор + дугогасящий реактор), адаптивные резисторы на полупроводниковых ключах и активное заземление с использованием управляемых инверторов.

Сделанные выводы ограничены конкретными схемами сетей, типами кабелей, параметрами резисторов, уставками защиты и нормативными условиями.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2021. 512 с. ISBN: 978-5-93673-525-6

2. Вайнштейн Р.А., Шестакова В.В., Юдин С.М., Гурин Т.С. Учет дуговых перемежающихся замыканий при выборе тока срабатывания защиты от замыканий на землю в сети с резистивным заземлением нейтрали // Известия вузов. Электромеханика. 2006. № 3. С. 115-118. EDN: KGCUQP

3. Ляхомский А.В., Кузьмин С.В., Кудряшов А.П., Завалов А.А. Влияние сетей заземления на эффективность резистивного режима нейтрали и аварийность сетей 6-10 кВ угольных разрезов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2024. Т. 67. № 4. С. 89-100. DOI: 10.17213/0136-3360-2024-4-89-100 EDN: SNFPBM

4. IEEE Std C57.32a-2020. IEEE Standard for Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices - Amendment 1: Neutral Grounding Resistors Clause. IEEE, 2020.

5. IEC 60076-25:2023. Power transformers - Part 25: Neutral grounding resistors. IEC, 2023. 60 p.

6. Гвоздев Д.Б., Королев А.А., Назарычев А.Н., и др. Опыт реализации низкоомного резистивного заземления нейтрали в сети 6 кВ мегаполиса // Электричество. 2025. № 7. С. 17-29. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-7-17-29 EDN: WXCFFB

7. Адамович И.Н., Евдокимова В.С. Отличие электрических сетей 110 кВ с изолированной нейтралью от резистивно заземленной // НИРС АТФ-2025: материалы 81-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (Минск, 15-17 апр. 2025 г.). Минск: БНТУ, 2025. С. 533-537.

8. ГОСТ Р 58396-2019. Заземление нейтрали в электрических сетях напряжением 6-35 кВ. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2019. 24 с.
9. СТО 56947007-33.040.20.002-2020. Методика выбора режимов заземления нейтрали в сетях 110 кВ. М.: ПАО "ФСК ЕЭС", 2020. 35 с.
10. СТО 56947007-29.240.01.271-2019. Методические указания по технико-экономическому обоснованию электросетевых объектов. М.: ПАО "ФСК ЕЭС", 2019. 35 с.
11. Ильиных М.В., Телегин А.В. Российские и мировые стандарты по организации режима заземления нейтрали распределительных сетей и защите от дуговых перенапряжений. // Промышленная энергетика. 2023. № 11. С. 37-45. DOI: 10.34831/EP.2023.90.78.002 EDN: SCKYMS
12. Короткевич М.А., Железко В.М. Технико-экономическое обоснование целесообразности перевода электрической сети напряжением 6-10 кВ с режима изолированной или компенсированной нейтрали на режим её заземления через резистор // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2006. № 4. С. 78-83. EDN: PYSNNH
13. Министерство энергетики Российской Федерации. Проект изменений в ПУЭ (глава 1.2) в части разрешения резистивного заземления нейтрали для сетей 110 кВ. Опубликовано 15.02.2026.
14. Колодяжный В.В., Завьялов В.М. Режимы заземления нейтрали в электрических сетях среднего напряжения: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2024. 192 с. ISBN: 978-5-507-48215-1
15. Акционерное общество "РЭС". Технология низкоомного резистивного заземления нейтрали сети 10 кВ. Пресс-релиз, 2024.
16. Рыжкова Е.Н., Младзиевский Е.П., Цырук С.А. Методика определения показателей эффективности сетей 6 - 35 кВ в зависимости от состояния нейтрали // Промышленная энергетика. 2021. № 1. С. 24-31. DOI: 10.34831/EP.2020.71.81.001 EDN: BGACXM