

## РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР РЕЗИСТИВНОГО РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ С УЧЕТОМ ПРАКТИЧЕСКОГО ОПЫТА И ПОЛОЖЕНИЙ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

к.т.н. Ширковец А.И.<sup>1</sup>, к.т.н. Кудряшов Д.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, ООО «Болид»,  
г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,  
г. Кемерово, Россия

**Аннотация.** Представлены эксплуатационные и проектные условия выбора варианта режима резистивного заземления нейтрали в электрических сетях напряжением до 35 кВ включительно. Приведен анализ соответствующей нормативной документации. Показано, что в зависимости от конструкции сети, наличия резервирования, вида изоляции высоковольтного оборудования, релейной защиты и ее настройки главным является вопрос о принципе реагирования на возникновение однофазного замыкания в сети. Традиционный подход означает удержание замыкания на землю на время оперативных переключений и поиска повреждения, что может продолжаться от единиц минут до нескольких часов и привести в итоге к отключению сразу нескольких линий из-за пробоев междуфазной изоляции. В этом случае для защиты оборудования применяют высокоомное или комбинированное заземление нейтрали. Быстрое и селективное отключение однофазного замыкания, по аналогии с короткими замыканиями, позволит избежать развития таких нарушений, что достигается с помощью низкоомных резисторов. Отмечено, что показателем эффективности выбранного решения по заземлению нейтрали является снижение числа аварийных отказов в сети после его реализации.

**Ключевые слова:** электрическая сеть, однофазное замыкание на землю, перенапряжения, режим нейтрали, условия выбора, резистивное заземление, комбинированное заземление, низкоомный резистор.

### Введение

Современные требования к показателям надежности электроснабжения потребителей и качеству электроэнергии обеспечивают актуальность задачи по защите электрических сетей напряжением 6-35 кВ в схемах выдачи мощности электростанций, в распределительном электросетевом комплексе и системах электроснабжения промышленных предприятий и объектов городской инфраструктуры. Правильный выбор режима заземления нейтрали напрямую влияет на уровни надежности и безопасности эксплуатации в электрических сетях среднего напряжения. Режим нейтрали определяет значения тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), амплитудно-частотные харак-

теристики перенапряжений при дуговых пробоях изоляции, степень разрушения оборудования, время поиска и ликвидации повреждения [1, 2]. Следовательно, при проектировании и модернизации режима нейтрали необходимо тщательное изучение конкретной схемы сети, установленной на присоединениях релейной защиты, датчиков тока и напряжения, эксплуатационных режимов с учетом запитанных потребителей и других условий.

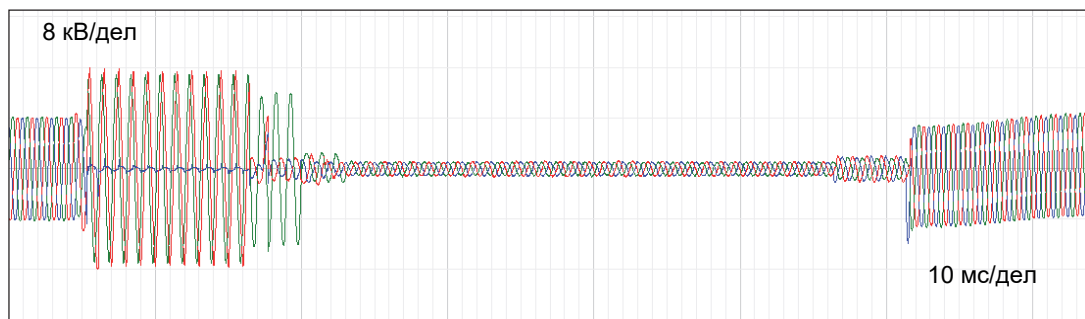
Негативные эффекты, возникающие при ОЗЗ и его развитии, характеризуются перенапряжениями на неповрежденных фазах, вероятностью перехода ОЗЗ в двухфазное короткое замыкание (КЗ) на землю или междуфазное КЗ, что вызывает множественные повреждения изоляции оборудования, феррорезонансные явления с насыщением трансформаторов напряжения и, в ряде случаев, повреждением их первичных обмоток из-за протекания токов, существенно превышающих номинальные [3]. Не отключенные замыкания на землю несут опасность поражения людей и животных, особенно в воздушных сетях, за счет попадания под шаговое напряжение, чреватые разрушением железобетонных опор, возникновением пожаров с выгоранием электроустановок, электродуговые процессы при неустойчивой «земле» вызывают значительные помехи на линиях связи.

Для иллюстрации проблематики на рис. 1 представлена осциллограмма ОЗЗ продолжительностью 0,22 с с переходом в двухфазное КЗ продолжительностью 0,07 с и дальнейшим развитием в трехфазное КЗ продолжительностью 0,83 с, зафиксированное одновременно на двух секциях ПС 110/10 кВ. Запись файлов одновременно с двух секций объясняется тем, что был включен секционный выключатель (СМВ), на котором и произошло перекрытие изоляции. Перед отключением трехфазного КЗ наблюдается сброс нагрузки с увеличением фазных напряжений приблизительно в два раза. На второй секции шин 10 кВ наблюдаются высокие уровни перенапряжений: при однофазном замыкании на землю  $K_U = 23,61 \text{ кВ} / 7,66 \text{ кВ} = 3,08$  о.е. (фаза В), при переходе ОЗЗ в двухфазное КЗ –  $K_U = 28,33 \text{ кВ} / 7,66 \text{ кВ} = 3,70$  о.е. (фаза В) при 1-м пробое и  $K_U = 27,49 \text{ кВ} / 7,66 \text{ кВ} = 3,59$  о.е. (фаза В) при 2-м пробое. По информации диспетчерской службы сети, причиной возникновения и развития нарушения стало перекрытие изоляции СМВ-10 в РП в результате проникновения мелкого животного в РУ-10 кВ.

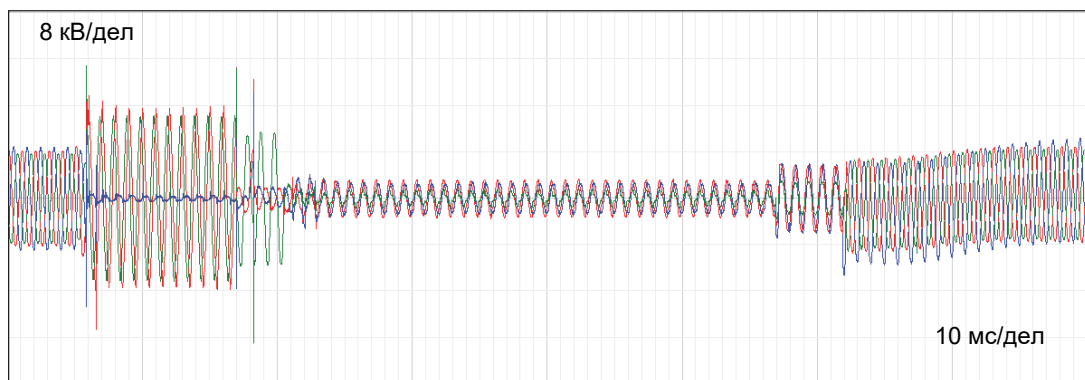
К объективным факторам, которые должны учитываться при проектировании и реализации технических решений по заземлению нейтрали, следует отнести:

- внедрение нового оборудования с твердой изоляцией, такой как сшитый полиэтилен (СПЭ) и этилен-пропиленовая резина (ЭПР) в конструкции силовых кабелей, эпоксидные компаунды для литых трансформаторов напряжения и силовых трансформаторов до 35 кВ,
- относительно небольшие запасы по электрической прочности оборудования с витковой изоляцией;
- необходимость глубокого ограничения внутренних перенапряжений при коммутациях вакуумных выключателей и дуговых ОЗЗ;

- высокие требования к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии с выполнением норм ГОСТ 32144-2013 [4],
- применение преобразовательной и выпрямительной техники (светодиодное освещение, выпрямительные установки силовой электроники, устройства плавного пуска электродвигателей и частотного регулирования, преобразовательные трансформаторы и пр.), искажающей питающее напряжение.



а



б

Рис. 1. Фрагмент аварийного события при развитии ОЗЗ на разных секциях шин ПС 110/10 кВ при переходе ОЗЗ в двухфазное КЗ:

а – 1 секция 10 кВ, б – 2 секция 10 кВ

Электрические сети напряжением 6-35 кВ зачастую имеют большую суммарную протяженность линий для электрически связанного участка сети, составляющую от 20 до 100 км, а иногда и более. Очевидно, за счет распределения разного рода дефектов (газовые включения и микрополости в твердой или пропитанной изоляции, нарушения толщин слоев, треки частичных разрядов и пр.) на элементах линий повышается опасность их выхода из строя и аварийного отключения. Поэтому в разветвленных сетях, преимущественно кабельных, а также при замене участков воздушной сети 35 кВ

на КЛ, емкостные токи могут превышать 100 А. Неизбежно большие значения остаточного тока, вызванные расстройкой ДГР, активной проводимостью изоляции на землю, а также высшими гармониками [5], ставят вопросы, во-первых, эффективности компенсации емкостного тока промышленной частоты, а во-вторых, принципиального подхода – нужно ли вообще держать дольше 5 – 10 с в работе линию с однофазным повреждением, если это практически во всех случаях приведет к переходу в КЗ с отключением.

Сегодня при проектировании и строительстве распределительных сетей стандартной практикой является применение кабельных линий (КЛ) на основе кабельной техники с изоляцией СПЭ и ЭПР, измерительных и силовых трансформаторов с твердой изоляцией на основе эпоксидных компаундов. Наилучшим способом продления ресурса такого оборудования является быстрое отключение каждого однофазного замыкания, подобно тому, как работает защита в сетях с глухим заземлением нейтрали. Очевидно, для электрических сетей, характеризующихся значительным уровнем деградации изоляции, также целесообразно снизить длительность ОЗЗ до долей и единиц секунд.

Опыт эксплуатации распределительных сетей различной конструкции и назначения подтверждает, что удержание «земли» увеличивает вероятность возникновения КЗ, а значит, растет опасность возникновения пожаров из-за воздействия силовой электрической дуги. Следовательно, важной задачей является автоматическое выявление и отключения участка электрической сети с ОЗЗ. Такой подход тем более оправдан, что правильный выбор заземления нейтрали позволяет исключить условия феррорезонанса, который возникает исключительно при изолированной нейтрали сети [6]. От изолированной нейтрали следует отказаться и по следующей причине: дуговые замыкания в режиме неотключенной «земли» вызывают большое энерговыделение, что для установленных нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) может оказаться критичным из-за превышения их энергоемкости, поэтому использовать ОПН для защиты от дуговых перенапряжений нецелесообразно.

При выборе средств и методов ограничения внутренних перенапряжений в сетях 6-35 кВ применяются нормы действующего РД 153-34.3-35.125-99 [7]. Значения перенапряжений, рассчитываемые по формулам в Приложении 10 указанного документа, составляют относительно амплитуды наибольшего фазного напряжения 7,0 о.е., 5,9 о.е., 4,3 о.е. для оборудования 6, 10, 35 кВ соответственно. Однако в других источниках можно встретить иные уровни перенапряжений, которые являются заниженными и поэтому некорректными. Например, при различении не по уровню изоляции, а по видам оборудования для трансформаторов 6, 10 и 35 кВ имеются следующие значения допустимых перенапряжений – 5,4 о.е., 5,0 о.е., 3,15 о.е., а для силовых кабелей тех же классов напряжения – еще меньше, 3,4 о.е., 3,3 о.е., 2,67 о.е. [8, табл. 1.10.2]. Эти значения настораживают, поскольку последние три из них с очевидностью отвечают условию отказа кабельной изоляции практически при любом замыкании на землю с перемежающейся дугой, т.к. если неограниченные перенапряжения превысят 2,5 о.е. (что

характерно для первого пробоя) и достигнут 3,0 – 3,5 о.е. при эскалации в цикле с двумя и более пробоями на «землю» подряд, что для сети 10 кВ составляет 26 – 29 кВ. В этом случае достаточно высок риск повреждения изоляции.

### Нормативная документация

Нормативно-техническое регулирование в отрасли реализовано на основе федерального закона «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 №35-ФЗ, созданных на основе многолетнего опыта Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ [9], выполнение которых контролируется органами Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). К сожалению, раздел Правил по защите от перенапряжений и режимам нейтрали [9, пп. 619...626] содержит разночтения и противоречия, отсутствует строгая последовательность и ясность изложения, поэтому практическое применение этих положений затруднено [10]. Что показательно, в указанном документе *нет прямого указания на допустимость применения изолированной нейтрали.*

Согласно действующему Положению о единой технической политике ПАО «Россети», пп. 8.1.6.2.1 «Электрические сети 3-35 кВ должны работать с изолированной, а также с заземленной через резистор или дугогасящий реактор нейтралью» [11], что дословно повторяет текст пп. 1.2.16 ПУЭ. Следует отметить, однако, что документы ПАО «Россети» не являются обязательными для иных организаций, эксплуатирующих объекты энергетики. Также согласно письму Минэнерго от 23.03.2023 №05-1798 *«В настоящее время действуют все разделы шестого и седьмого издания Правил устройства электроустановок (далее – ПУЭ). Однако отмечаем, что ПУЭ не были зарегистрированы Минюстом России, в связи с чем не подлежат обязательному применению. В то же время ПУЭ можно руководствоваться в добровольном порядке в части, не противоречащей действующему законодательству Российской Федерации».*

В числе документов, используемых при проектировании режима нейтрали, часто применяется РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87) [12]. Этот документ, не отмененный, но и не имеющий четкого статуса, с 2015 г. перерабатывается в ПАО «Россети», однако его новая редакция до сих пор не утверждена и не опубликована. При расчете мощности дугогасящего реактора (ДГР) в качестве нормативного по РД 34.20.179 обычно принимается коэффициент запаса, равный 1,25 с учетом развития сети в перспективе 10 лет. Этот же коэффициент в большинстве случаев используется для оценки перспективного значения емкостного тока при выборе параметров низкоомного резистивного заземления. Учитывая активное развитие сетей с со строительством новых линий на основе кабелей с изоляцией СПЭ, эксплуатирующие организации склоняются к повышению коэффициента развития до 1,4 – 1,5 (реже до 2,0), ограниченного по сути допустимой токовой перегрузкой кабелей в расчете на максимально возможное нагружение участков сети при оперативных переключениях.

Сложным для однозначного решения является вопрос о компенсации емкостных токов, регламентированной при известных значениях более 30, 20, 10 А в сетях 6, 10, 35 кВ соответственно [9, п.619]. Однако в том же документе отмечается, что при наличии в сети КЛ с изоляцией СПЭ следует предусматривать быстрое отключение ОЗЗ посредством низкоомного заземления нейтрали. Учитывая, что емкостные токи в развитой кабельной сети зачастую превышают указанные нормативные значения (достигая иногда уже не десятков, а сотен ампер), возникают сложности с трактовкой ПТЭ ЭСС.

В настоящее время интенсивность строительства сетей в рамках технического присоединения, активный переход от ВЛ к КЛ в условиях населенных пунктов и, безусловно, в городской застройке, а также перекладка с заменой старых кабелей с БПИ на кабели СПЭ, довольно высока. Поэтому доля увеличения емкостного тока при выборе перспективы для разных сетей может существенно отличаться от нормативного значения 25%, для инженерной оценки с заказчиком согласуются цифры примерно от 10% до двух крат.

До настоящего времени не существует документа федерального уровня, который в достаточной мере и с необходимой полнотой решал бы вопросы выбора и обоснования режима заземления нейтрали электрических сетей 6-35 кВ, опираясь на многолетний опыт эксплуатации, теоретические исследования и разработки оборудования. В этой области, тем не менее, существует ряд стандартов организаций («Россети Московский регион», «Россети Ленэнерго», «Россети Волга», «Россети Сибирь», «ЛУКОЙЛ», «Газпром», в Республике Беларусь – стандарт государственного концерна «Белэнерго») [13], на их основе сегодня разрабатывается единый стандарт по выбору режима нейтрали для ПАО «Россети». В ПАО «Ленэнерго» действует новый документ по режимам нейтрали, принятый в 2025 г. [14]. После обсуждения на НТС с большой вероятностью последний документ будет утвержден для применения во всех дочерних обществах электросетевого хозяйства ПАО «Россети». Пожалуй, наиболее кратким и в то же время содержательным из обозначенных стандартов является СТО Газпром 2-1.11-070-2006, где в табличном виде сведены четкие рекомендации по выбору режима заземления нейтрали в сетях напряжением 6 и 10 кВ, даны соответствующие формулы для оценки параметров оборудования [15].

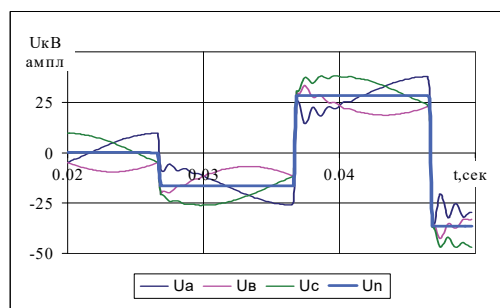
Детальный анализ отечественной и зарубежной нормативной документации по организации режима заземления нейтрали распределительных сетей и защите от перенапряжений при замыканиях на землю представлен в [16]. Далее рассмотрены особенности основных видов резистивного заземления нейтрали, применяемых в проектной и эксплуатационной практике.

### **Резистивное заземление нейтрали**

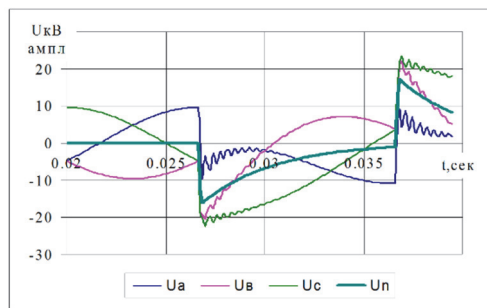
Определение вида резистивного заземления нейтрали и выбор сопротивления резистора выполняется, как правило, на основе ряда критериев, таких как выполнение условий по электробезопасности, обеспечение определенной категории надежности электроснабжения потребителей, снижение уровня дуговых перенапряжений при ОЗЗ,

организация надежной релейной защиты от ОЗЗ, минимизация изменений состава оборудования, минимизация затрат на реконструкцию действующей сети.

При включении в нейтраль сети 6-35 кВ резистора переходный процесс становится апериодическим, что достигается путем разряда емкости здоровых фаз за время бестоковой паузы через резистор заземления нейтрали (рис. 2). Ограничение перенапряжений тем глубже, чем ниже сопротивление резистора (и выше его ток), уровень – не более, чем в первом пробое  $(2,4 - 2,5)U_{\text{фmax}}$ . Если за счет большого тока замыкания на землю однофазная дуга становится устойчивой, то перенапряжения примерно через 1 – 2 периода частоты 50 Гц уже не превышают линейного напряжения.



а) эскалационный рост напряжений на неповрежденных фазах



б) снижение напряжения на нейтрали и ограничение перенапряжений в паузы между пробоями

Рис. 2. Расчетная осциллограмма переходного процесса при дуговом замыкании на землю в сети 10 кВ с изолированной (а) и резистивно-заземленной (б) нейтралью

Согласно [9, п. 619] при высокоомном заземлении нейтрали ток резистора должен быть равен и больше емкостного тока ОЗЗ  $I_R \geq I_C$ . Однако многочисленные расчеты показывают, что требуемый уровень ограничения можно обеспечить и при токе резистора несколько меньше емкостного тока ОЗЗ, что связано с активной проводимостью изоляции в конкретной сети (чем старше изоляция, тем выше активная проводимость, что снижает перенапряжения) и значением межфазной емкости. В подавляющем большинстве случаев, как подтверждает практика натурной регистрации перенапряжений, при первом пробое перенапряжения не достигают  $2,6U_{\text{фmax}}$ , в большинстве случаев  $K_U \leq 2,2 \dots 2,4$ . Поэтому справедливо следующее соотношение с учетом емкостного тока  $I_C$  для выбора сопротивления высокоомного резистора:

$$R_N \leq \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot (0,5 \div 1,0) I_C}. \quad (1)$$

Покажем возможность применения в расчетах при проектировании выражения (1). Оценку ограниченных за счет резистора перенапряжений можно выполнить следующим образом [17]. Значение фазы гашения дуги  $\psi_{\text{г}}$ , при которой напряжение на

нейтрали достигает максимума и обеспечивает наибольшие перенапряжения, определяется как:

$$\psi_{\Gamma} = \arcsin \frac{0,2 \left( \frac{I_R}{I_C} \right)^2 - \sqrt{\left( \frac{I_R}{I_C} \right)^2 + 1}}{\left( \frac{I_R}{I_C} \right)^2 + 1}. \quad (2)$$

Фаза зажигания дуги, отвечающая условию наибольших перенапряжений, не зависит от  $I_R/I_C$  и составляет  $\psi_3 \approx 68^\circ$ . С учетом выражения (2) перенапряжения в сети с резистивным заземлением нейтрали определяются как:

$$K_U = 1,71 + \frac{(1-d)C_{\Phi}}{C_{\Phi} + C_{\Phi\Phi}} \cdot \left[ 0,93 - (\sin \psi_{\Gamma} - 0,2) \cdot e^{-\frac{I_R}{I_C}(1,19 - \psi_{\Gamma})} \right], \quad (3)$$

где  $(1-d)$  – коэффициент демпфирования свободных колебаний; для широкого класса кабельных и смешанных сетей характерны значения  $d = 0,05 \div 0,10$ , что соответствует нормальной и ослабленной (например, после 10–15 лет эксплуатации) изоляции сети. Коэффициент  $d \geq 0,3 \div 0,5$  соответствует предельной степени старения или предпробойному состоянию изоляции.

Для определения номинала резистора и инженерной оценки уровня ограничения перенапряжений при дуговых ОЗЗ при различных соотношениях  $I_R/I_C$  и характерных коэффициентах  $d = 0,05 \div 0,10$  удобно пользоваться графиками, полученными на основе выражения (3) и представленными на рис. 3.

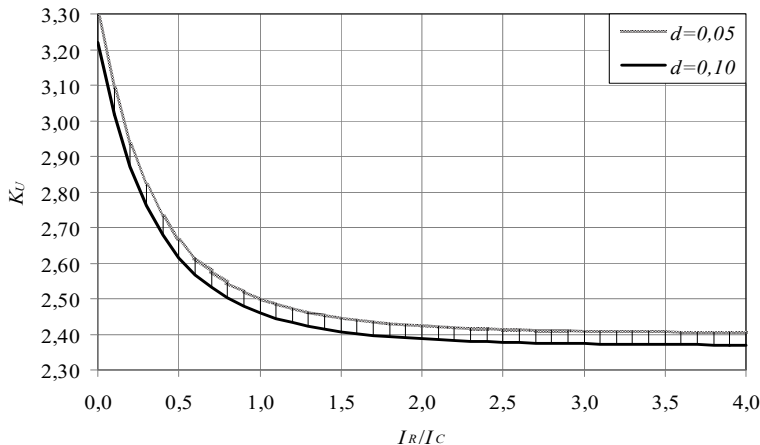


Рис. 3. Зависимость уровня перенапряжений при дуговых ОЗЗ в сети с резистивным заземлением нейтрали в зависимости от  $I_R/I_C$

Схемы включения высокоомных и низкоомных резисторов в нейтраль сети приведены на рис. 4 и 5. В зависимости от параметров подключаемых резисторов, в первую очередь их номинального тока (от единиц до сотен ампер) и рабочего времени его протекания (длительно или 5 – 10 с) мощности выбираемых нейтралеобразующих трансформаторов будут отличаться.

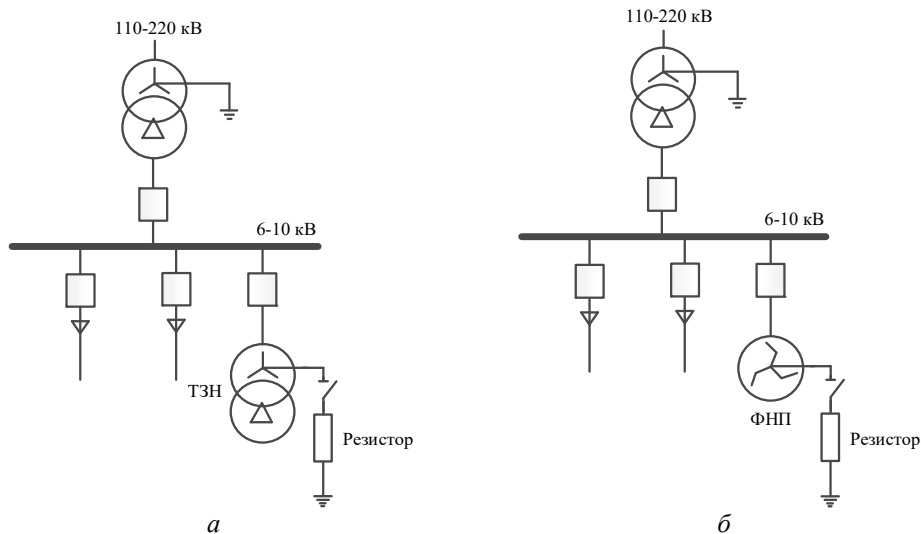


Рис. 4. Схемы включения резисторов в сети 6-10 кВ в нейтраль обмотки высокого напряжения трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y_0/\Delta$  (а) и в нейтраль фильтра нулевой последовательности со схемой  $Z_0$  (б)

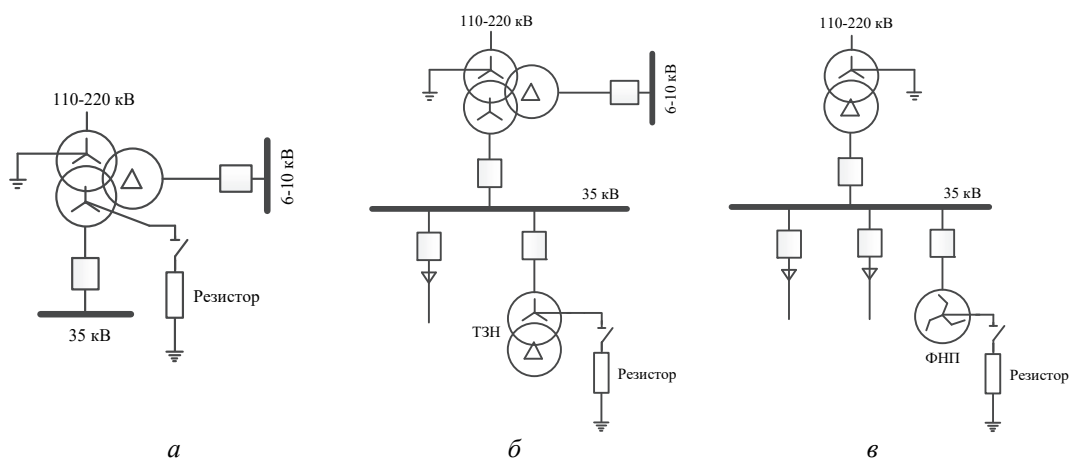


Рис. 5. Схемы подключения резисторов в сети 35 кВ:

а – в нейтрали обмотки 35 кВ трехобмоточного питающего трансформатора; б – в нейтрали обмотки 35 кВ трансформатора  $Y_0/D$ ; в – в нейтрали обмотки 35 кВ фильтра «зигзаг»

Таким образом, резистор устанавливается на каждой секции 6-35 кВ в центрах питания 110-220 кВ. Подключение резисторов к нейтрали сети 6-10 кВ выполняется через заземляющие трансформаторы  $Y_0/D$  или фильтры со схемой «зигзаг»  $Z_0$ . Для низкоомных резисторов 6-10 кВ мощность трансформаторов редко превышает 1000 кВА. Следует отметить, что фильтры  $Z_0$  обладают лучшими массогабаритными показателями, имеют меньшие в 1,4–1,8 раз потери х.х. и меньшее в 2–3 раза сопротивление нулевой последовательности (по сравнению с трансформаторами  $Y_0/D$ ). Важно при проектировании правильно выбрать параметры нейтралера с учетом требований по изоляции, условиям размещения, а главное – условиям нагрузки (перегрузки) трансформатора током резистора.

Включение высокоомного резистора (рис. 6) в сеть имеет ряд особенностей, которые показаны в табл. 1.

Таблица 1

#### Особенности режима заземления нейтрали через высокоомный резистор

Преимущества	На что следует обратить внимание
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Снижение перенапряжения при дуговых ОЗЗ до относительно безопасного уровня;</li> <li>– уменьшение риска развития аварий с многоместными повреждениями, каскадными (всерными) отключениями;</li> <li>– ликвидация резонансных (феррорезонансных) явлений, независимо от причины их возникновения;</li> <li>– улучшение условий для быстрой самоделиквидации ОЗЗ в воздушных сетях и на кабелях с бумажно-пропитанной изоляцией;</li> <li>– повышение надежности срабатывания релейной защиты от ОЗЗ;</li> <li>– селективное определение и, при необходимости, отключение фидера с замыканием на землю с помощью релейной защиты при обеспечении достаточной ее чувствительности.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– В городских сетях с протяженными КЛ и изменением конфигурации не всегда удастся обеспечить селективную работу ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности (ТЗНП);</li> <li>– проблема обеспечения чувствительности ненаправленных токовых защит при большом многообразии эксплуатационных режимов, а также необходимости их частой перенастройки;</li> <li>– опасность электропоражения персонала и посторонних лиц при увеличении времени существования замыкания на землю;</li> <li>– направленные защиты реализовать возможно, но их применение осложнено двумя факторами: а) не гарантируется устойчивое горение дуги ОЗЗ в зависимости от соотношения <math>I_R/I_C</math> для текущего режима эксплуатации; б) имеются угловые погрешности ТНП, которые не нормированы.</li> </ul>



*Рис. 6.* Высокоомные резисторы 6900 Ом/35 кВ/ длительной работы на ПС 110/35/6, включенные в нейтраль силового трансформатора 40 МВА

### **Комбинированное заземление нейтрали**

Этот способ может быть реализован в нескольких схемных вариантах – с постоянным подключением параллельно первичной обмотке ДГР высокоомного резистора, рассчитанного на длительную работу в режиме ОЗЗ, либо с кратковременным подключением низкоомного (сильноточного) резистора во обмотке управления ДГР напряжением 500 В, а также с коммутируемым высоковольтным резистором параллельно ДГР. Резистор в этой схеме включается через однополюсный выключатель в ту же нейтральную точку, что и реактор. Такая схема применяется и за рубежом, например в Польше. Далее рассматриваем традиционный и более широко используемый на практике вариант первой схемы [18], реализуемой согласно схемам рис. 7.

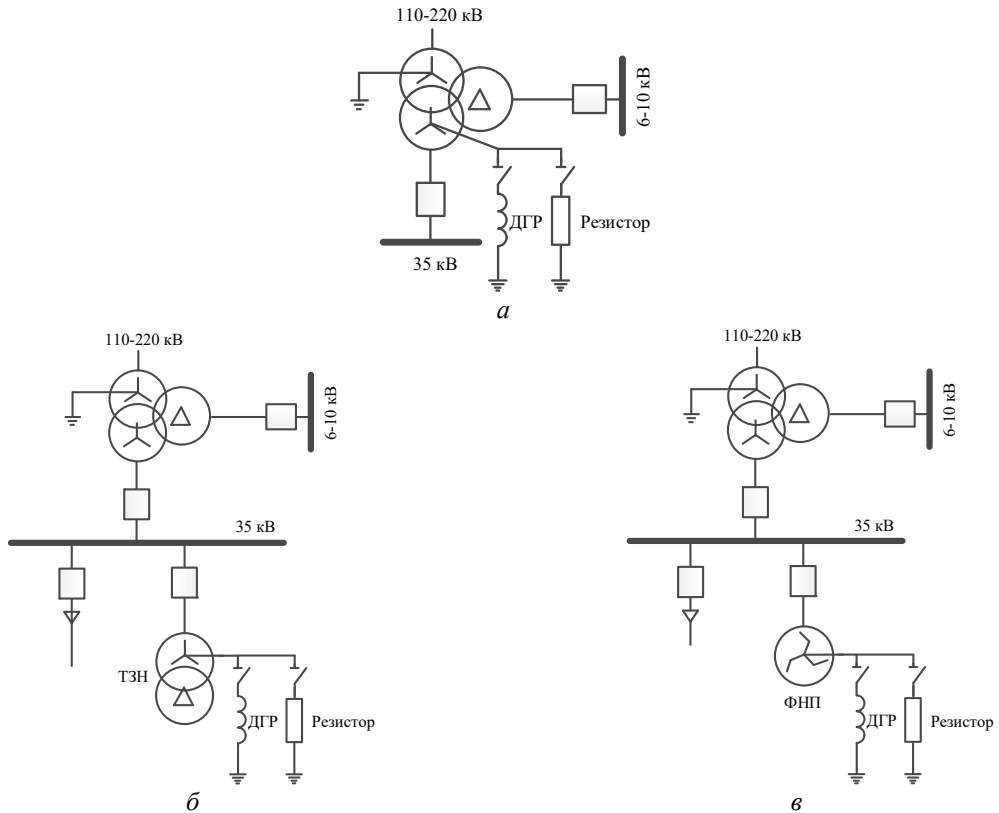


Рис. 7. Схемы комбинированного заземления нейтрали с подключением ДГР и резисторов в нейтраль 35 кВ питающего трехобмоточного трансформатора 110-220 кВ (а), отдельного трансформатора Yо/D (б) и отдельного фильтра «зигзаг» (в)

Исключение перенапряжений в сети с ДГР при его расстройке, превышающей 5 %, и создание условий для действия релейной защиты на сигнал с последующим плановым отключением ОЗЗ осуществляется подключением параллельно ДГР резистора с сопротивлением, определяемым исходя из максимального ожидаемого значения тока раскомпенсации  $\Delta I$  (емкостного тока наиболее протяженного фидера от РП либо, реке, от головной ПС) по формуле:

$$R_N \geq \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot (0,5 \div 1,0) \cdot \Delta I} \quad (4)$$

при этом максимальные перенапряжения не превышают уровня  $2,6U_{ф\max}$ .

Оценка эффективности резистора в части ограничения уровня дуговых перенапряжений при ОЗЗ при разных расстройках компенсации и коэффициентах демпфирования (значения  $d \geq 0,1$  соответствуют сети с резистором) представлена на рис. 8.

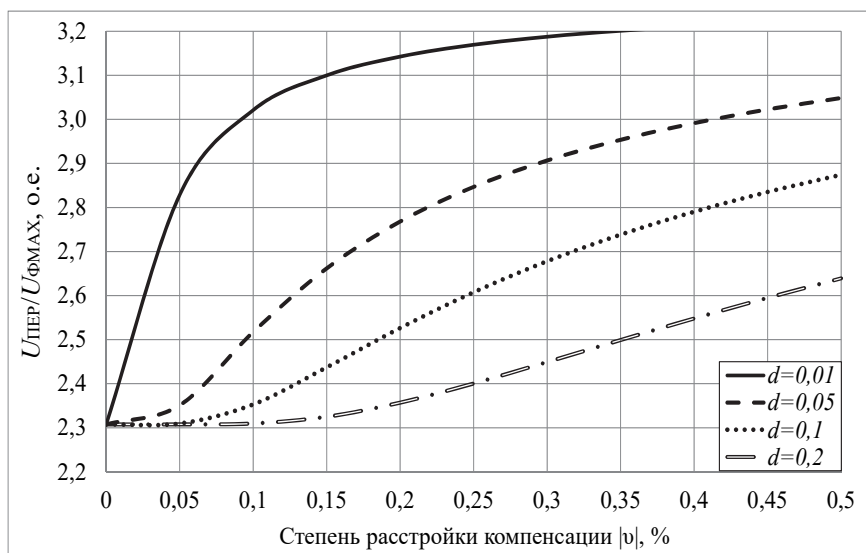


Рис. 8. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю в зависимости от расстройки компенсации и влияния резистора

Параллельное включение ДГР и высокоомного резистора обеспечивает (рис. 9):

1. Снижение уровня перенапряжений до безопасных для изоляции электрооборудования величин; тезис справедлив для любых случаев возникновения раскомпенсации в сети с ДГР – как при срабатывании защит, так и при оперативных переключениях в течение существования режима ОЗЗ.

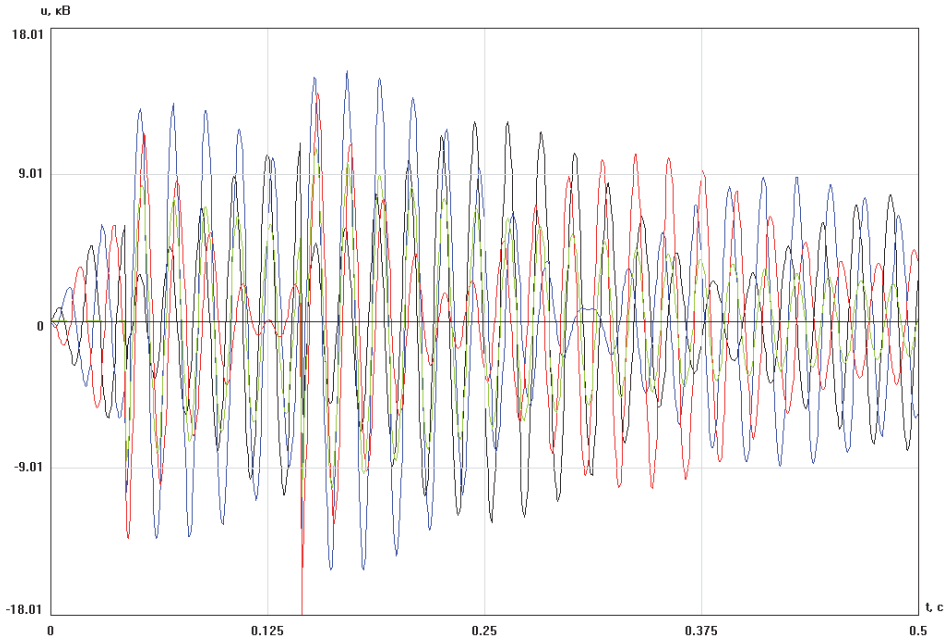
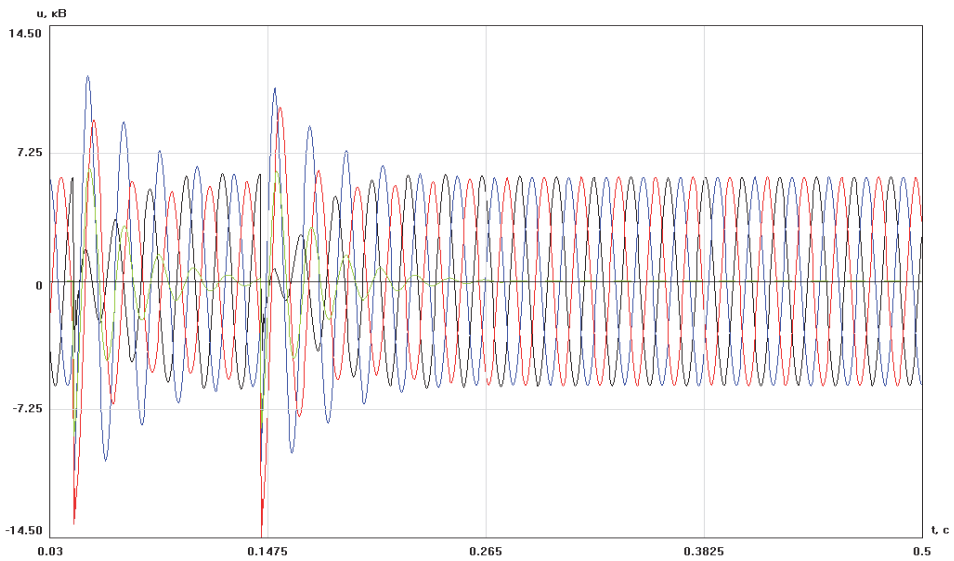
2. Устранение биений фазных напряжений промышленной частоты с амплитудой до  $(1,8-2,0)U_{\text{фмакс}}$ , возникающих после погасания дуги при существенных расстройках компенсации.

3. Симметрирование сети в нормальном режиме вследствие снижения напряжения смещения нейтрали; это позволяет ввести напряжение смещения нейтрали в допустимые пределы 15% длительно и 30% в течение 1 час по требованиям [9, п. 624].

4. Сокращение длительности горения дуги и времени восстановления электрической прочности изоляции; это позволяет практически полностью исключить переходы однофазных замыканий на землю в двойные/многочастные короткие замыкания.

5. Создание условий для улучшения селективности «земляных» защит с действием на сигнализацию или отключение электрооборудования; это может быть проблематично при резонансной настройке компенсации и наличии в контуре ОЗЗ некомпенсируемых с помощью ДГР высших гармоник.

6. Ликвидацию вероятных резонансных процессов, обусловленных наличием в токе ОЗЗ гармонических составляющих независимо от их уровня и природы возникновения.

**а****б**

*Рис. 9.* Компьютерные оциллограммы напряжений на фазах и нейтрали при дуговом ОЗЗ в сети 6 кВ с включенным ДГР (а) при  $I_C = 26,6$  А,  $I_{ДГР} = 31,4$  А,  $\Delta I = 4,8$  А (-18%) и комбинированном заземлении с резистором 600 Ом (б)

Классическая схема с высокоомными резисторами, включенными параллельно силовой обмотке ДГР, активно используется на электросетевых и генерирующих предприятиях с 1998-2000 гг. в классах 6-35 кВ и нормативно закреплена в ряде отраслевых стандартов [13, 14, 15]. Характерные особенности режима нейтрали с параллельным включением ДГР и высокоомного резистора сведены в табл. 2.

Таблица 2

### Особенности комбинированного заземления нейтрали

Преимущества	На что следует обратить внимание
<ul style="list-style-type: none"> <li>– снижение уровня перенапряжений, для любых случаев возникновения раскомпенсации в сети с ДГР;</li> <li>– снижение риска перехода ОЗЗ в КЗ, в том числе за счет ограничения перенапряжений и устранения биений фазных напряжений, возникающих после погасания дуги при существенных расстройках компенсации;</li> <li>– симметрирование сети вследствие снижения напряжения смещения нейтрали; обеспечение требований ПТЭ ЭСиС;</li> <li>– сокращение длительности горения однофазной дуги в кабелях с бумажно-пропитанной изоляцией;</li> <li>– улучшение селективности защит от замыканий на землю с действием на сигнализацию или отключение;</li> <li>– ликвидация резонансных и феррорезонансных процессов, независимо от природы их возникновения.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– большие массогабаритные показатели оборудования, особенно в сетях 35 кВ;</li> <li>– сложность в ряде случаев организации селективных ТЗНП, в основном из-за недостаточности коэффициентов чувствительности при больших собственных емкостных отходящих линий и небольшом токе резистора;</li> <li>– опасность электропоражения персонала и посторонних лиц при длительном существовании замыкания на землю в сети.</li> </ul>

Оптимальные области применения такого режима нейтрали – электрические сети, где невозможно по разным причинам перейти к отключению всех без исключения присоединений при ОЗЗ, прежде всего изношенные кабельные сети большой протяженности в схемах выдачи мощности ТЭЦ и ГРЭС, а также воздушные и воздушно-кабельные сети, где затруднительно выполнить выравнивание емкостей по фазам (т.е. при сверхнормативной несимметрии, наличии ступенчатых ДГР). Совместное применение управляемых ДГР с современной автоматикой и высокоомных резисторов серии РЗ дает снижение числа аварийных отключений в сети в 2...3 раза. Это выражается в исключении пережога проводов ВЛ, предупреждении отказов ТН и ОПН, а также многоместных пробоев КЛ [19].

Опыт эксплуатации в сетях собственных нужд электростанций положительный: в частности, из-за перенапряжений при однофазных пробоях 6 кВ Энгельсской ТЭЦ-3 (эксплуатируется 65 ЭД) и Саратовской ТЭЦ-2 (эксплуатируется 110 ЭД) до установки

резисторов ежегодно повреждалось до 6 машин. После установки резисторов повреждения прекратились. Таким же образом была решена проблема останова технологических ЭД в схемах с.н. на Камчатской ГЭЦ-2, а также на Сахалинской ГРЭС.

Пример реализации комбинированного заземления в процессе реконструкции четырехсекционной подстанции 110/10 кВ приведен на рис. 10.



*Рис. 10. Установка высокоомных резисторов 1000 Ом/10 кВ/ длительной работы параллельно плунжерным ДГР 500 кВА с автоматическим управлением в нейтрали отдельных присоединительных трансформаторов 630 кВА*

### **Низкоомное резистивное заземление нейтрали**

Изношенность эксплуатируемого оборудования, массовое внедрение кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена и другого оборудования с твердой изоляцией способствуют переходу ОЗЗ в короткие замыкания с аварийным отключением и значительным объемом повреждений. Актуальной задачей для современных сетей 6–35 кВ является локализация и быстрая ликвидация ОЗЗ, предотвращение перехода в КЗ.

Для решения этой задачи в кабельных и смешанных сетях 6–35 кВ активно внедряется низкоомное резистивное заземление нейтрали с установкой специального

силового оборудования, оснащением присоединений прилегающей сети релейными защитами и датчиками тока. При этом достигается:

- исключение коротких замыканий, возникающих при развитии ОЗЗ, снижение динамических воздействий на электрооборудование;
- исключение многоместных повреждений и каскадных отключений присоединений;
- сохранение дорогостоящего оборудования за счет ограничения перенапряжений;
- оперативное выявление и локализация участка с ОЗЗ с автоматическим включением резерва и минимизацией времени восстановления питания.

Применение низкоомного резистивного заземления закреплено в действующей редакции Правил технической эксплуатации [9]:

– п. 619 «...Низкоомное резистивное заземление нейтрали следует применять в случаях, когда однофазное замыкание на землю должно быть селективно отключено в течение минимально возможного времени, а также при наличии в сети кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. При этом ток в нейтрали должен быть достаточным для работы релейной защиты на отключение»;

– п. 621 «...При превышении значений емкостного тока, указанных в настоящем пункте Правил <30 А, 20 А, 15 А, 10 А для сетей 6, 10, 15-20, 35 кВ соответственно и 10 А – для любых сетей с ВЛ на металлических и железобетонных опорах> должно применяться заземление нейтрали посредством системы компенсации емкостных токов... либо через низкоомный резистор...».

На основе многолетнего опыта внедрения [13, 20, 21] подтверждено, что количество отключений после ввода низкоомных резисторов не увеличивается, а наоборот, кратно снижается. Это обусловлено защитным демпфирующим действием резисторов.

Таким образом, на большом активном токе от резистора в нейтрали становится возможным построить простую (ненаправленную) токовую защиту нулевой последовательности и быстро отключать поврежденную КЛ с «землей». Режим с отключением ОЗЗ реализует технологию «щадящей» эксплуатации, что крайне важно для оборудования с твердой невосстанавливаемой изоляцией.

На практике сопротивление резистора выбирают наименьшим, исходя из двух условий [21].

**Первое** – обеспечение устойчивого горения дуги при ОЗЗ, при котором ток резистора должен превышать емкостный ток ОЗЗ в  $k = 1 \dots 5$  раз:

$$I_R \geq kI_C \Rightarrow R_N \leq \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot kI_C}, \quad (5)$$

где  $I_C$  – суммарный емкостный ток электрически единого участка сети в нормальном режиме с учетом увеличения за счет оперативных переключений (при допустимой нагрузке). В расчетном значении  $I_C$  должен быть учтен запас на развитие сети 25%

или выше, а также, при необходимости, выполнен учет недостающих исходных данных (примерно от 10% до двух крат);  $I_R$  – активный ток резистора.

**Второе** – обеспечение селективного срабатывания простых токовых защит на отключение ОЗЗ, при котором ток резистора должен превышать максимальный ток срабатывания защиты  $I_{C3\max}$  от ОЗЗ. При этом требуемое сопротивление резистора по критерию надежной работы релейной защиты от ОЗЗ определяется по выражению:

$$R_N \leq \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}I_{C3\max} \cdot k_{\text{Ч}} \cdot k_{\Omega}}, \quad (6)$$

где  $I_{C3\max}$  – максимальный ток срабатывания релейной защиты от ОЗЗ;

$k_{\text{Ч}} = 1,5$  – коэффициент чувствительности [22, п. 14а];

$k_{\Omega} = 1,0 - 3,0$  – коэффициент запаса, учитывающий погрешность трансформаторов тока нулевой последовательности, переходное сопротивление в месте замыкания и суммарное сопротивление цепи протекания тока ОЗЗ, время отключения ОЗЗ, изменение сопротивления резистора при нагревании в рабочих режимах.

При выполнении условия (5) в большинстве случаев выполняются условия (6), (7), но не наоборот. Следует отметить, что более распространенными и внесенными в нормативную практику проектирования стандартами организаций, являются значения коэффициента, отвечающие условию устойчивой заземляющей дуги в формуле (5), в диапазоне  $k = 2,5 \dots 4,0$ , однако накопленный за последние 5 – 7 лет опыт внедрения низкоомных резисторов в сетях с большими емкостными токами  $I_C = 100 - 400$  А (и даже более) показал, что применимо следующее общее условие, которое не является, впрочем, обязательным (требует учета местных условий). Для выбора номинала низкоомного резистора в сети с емкостными токами замыкания на землю до 100 А приоритетным обычно считается условие гарантированного перевода перемежающейся дуги в устойчивую (5), при емкостных токах замыкания более 100 А – условие гарантированной работы релейных защит от ОЗЗ (6).

Для унификации параметров резисторов, предназначенных для установки на разных секциях одной подстанции, в зависимости от ряда расчетных и эксплуатационных условий, сопротивление резисторов может быть принято меньшим, чем определено по формулам (5) – (6). В табл. 3 сведены основные факторы, характеризующие низкоомное заземление нейтрали.

Экономическая целесообразность установки низкоомных резисторов обусловлена следующим. **Во-первых**, снижается аварийность в сети. Действительно, если поврежденное присоединение селективно отключается простой токовой защитой, исключаются переходы ОЗЗ в КЗ, веерные аварийные отключения, обеспечивается высокий уровень электро- и пожаробезопасности. **Во-вторых**, стоимость реализации низкоомного резистивного заземления, по укрупненным оценкам и сметным расчетам, в среднем ниже, чем, например, организация современных систем компенсации емкостного

тока с установкой более мощных нейтралеобразующих трансформаторов, дугогасящих реакторов, шкафов их автоматического управления и определения поврежденного фидера. Однако нужно иметь в виду, что значительную долю в общей стоимости реализации низкоомного заземления нейтрали составляет организация РЗА, АВР и гарантированного питания на РП прилегающей сети (50-60%).

Таблица 3

### Особенности режима заземления нейтрали через низкоомный резистор

Преимущества	На что следует обратить внимание
<ul style="list-style-type: none"> <li>– глубокое ограничение перенапряжений при ОЗЗ и снижение электрического нагружения изоляции, сохранение ее ресурса;</li> <li>– минимизация риска перехода ОЗЗ в КЗ с последующим аварийным отключением потребителей и повреждением оборудования;</li> <li>– исключение опасных феррорезонансных процессов с повреждением электромагнитных ТН;</li> <li>– организация селективной релейной защиты от ОЗЗ на основе простых токовых реле или функций ненаправленной защиты по 3I<sub>о</sub> с быстрым и селективным отключением поврежденного присоединения;</li> <li>– минимизация области повреждения при однофазном повреждении за счет быстрого его отключения;</li> <li>– предупреждение несчастных случаев поражения электрическим током людей и животных.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– требуется перенастройка релейных защит на селективное отключение всех присоединений при ОЗЗ (следует решить вопросы с собственниками электроустановок прилегающей сети с поэтапным переходом к новой технологии);</li> <li>– возможность повреждения оборудования относительно большим током замыкания в сотни ампер при отказе в срабатывании силовых выключателей, исполнительных устройств и релейных защит от ОЗЗ;</li> <li>– не следует применять в сетях с однолучевой схемой электроснабжения, при отсутствии АВР и на ВЛ, где потребитель будет отключен</li> <li>– после отключения линии с ОЗЗ снятия напряжения затруднительно обнаружить место замыкания, так как замыкание может самоликвидироваться;</li> <li>– быстрое действие защит от ОЗЗ (отключение за время 0,1 – 0,5 с на самых удаленных участках линий) не позволяет развиваться повреждению в КЛ, возникают сложности в отыскании места повреждения на КЛ с применением приборов по контролю тока утечки.</li> </ul>

Одним из ключевых положительных факторов низкоомного заземления является исключение рисков перехода ОЗЗ в короткие замыкания за счет селективного отключения первого ОЗЗ (рис. 11). Благодаря этому предотвращаются термическое и динамическое воздействия на жилы КЛ и обмотки силовых трансформаторов и реакторов, а при отключении замыкания не происходит срабатывания ресурса силового выключателя поврежденного присоединения, поскольку отключаемый ток замыкания сопоставим с нагрузочными токами и существенно ниже номинального отключения аппарата.

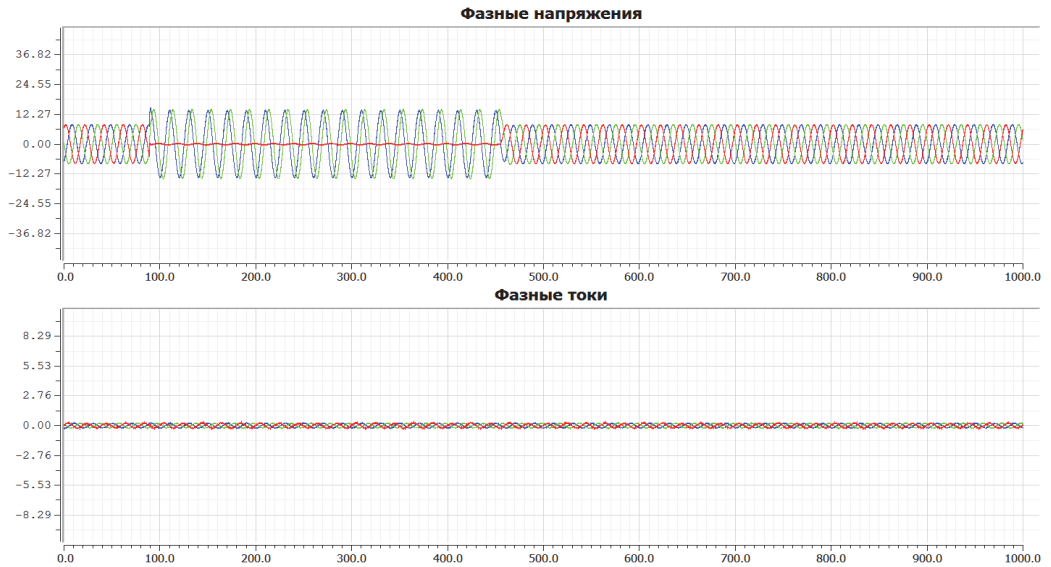


Рис. 11. Характерная натурная осциллограмма устойчивого ОЗЗ, селективно отключенного действием релейной защиты, в сети 10 кВ с низкоомным заземлением нейтрали

Типовым техническим решением в коллекторных кабельных сетях 35 кВ ветровых электростанций с выдачей мощности через ПС 110(220)/35 кВ является низкоомное заземление нейтрали (рис. 12), отвечающее нормативному условию отключения КЛ с СПЭ-изоляцией, из которых выполнены такие сети [9, п. 619].



Рис. 12. Устройство низкоомного резистивного заземления с параметрами 35 кВ / 75 Ом / 270 А / 10 с на Кузьминской ВЭС в закрытом корпусе (а) и снятыми боковыми панелями для техобслуживания (б)

В настоящее время низкоомное резистивное заземление нейтрали широко применяются в распределительных сетях ПАО «Россети Ленэнерго» (рис. 13) по принятой на 2016-2032 гг. Программе перевода кабельной сети 6-10 кВ Санкт-Петербурга на низкоомные резисторы [20], в АО «ОЭК» – в Москве опорная сеть 20 кВ строится исключительно с низкоомными резисторами в нейтрали [23], ПАО «Камчаткэнерго» – в Петропавловске-Камчатском городская сеть 6-10 кВ переводится на резисторы с 2016 г., АО «Региональные электрические сети» – в Новосибирске, пилотный проект 2021-2022 гг. на ПС 110/10 кВ «Воинская» [21]. Также заземление через низкоомные резисторы активно реализуется в электросетевых компаниях Грузии (АО «Теласи»), Кыргызстана (Чуйское предприятие электрических сетей ОАО «НЭСК», рис. 13), Казахстана (ТОО «Эталон Пауэр», ТОО «Новотэкс», АО «Астана-РЭК»), Беларуси (концерн «Белэнерго»), где суммарно установлены сотни низкоомных резисторов.

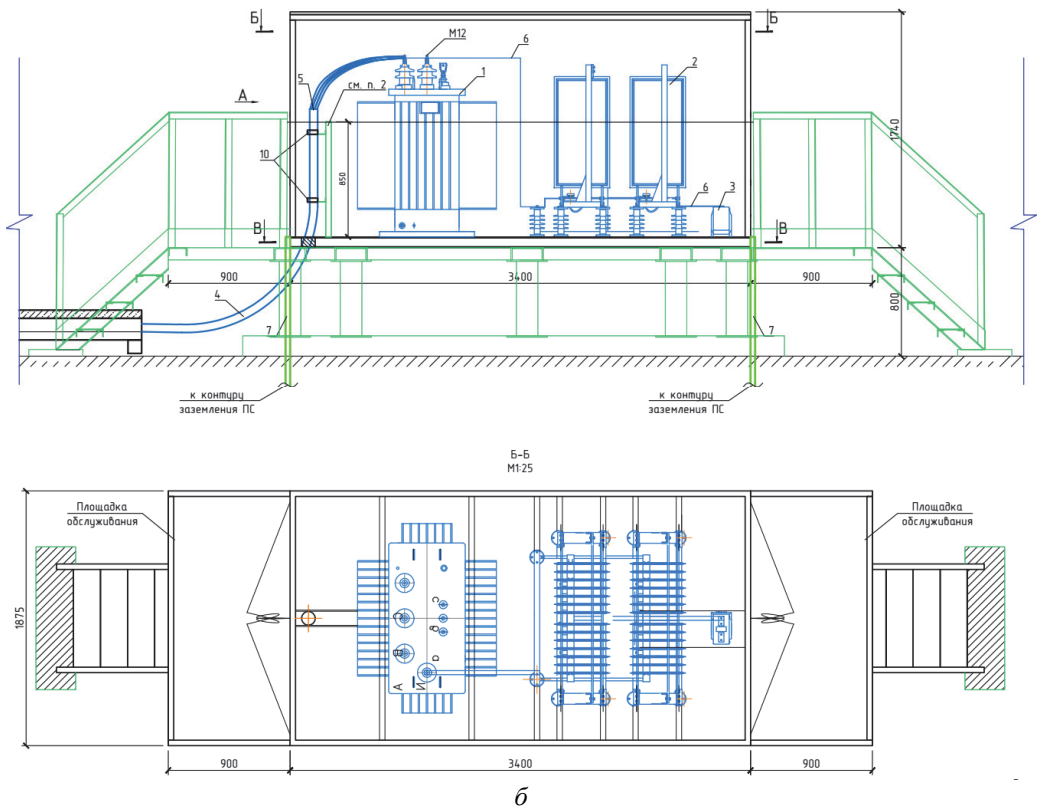


Рис. 13. Низкоомные резисторы открытой установки на ПС 110 кВ Чуйских электрических сетей, Кыргызстан (*а* – 50 Ом / 115 А / 10 кВ / 10 с) и на ПС 110 кВ в ПАО «Ленэнерго» (*б* – 29 Ом / 200 А / 10 кВ / 10 с)

На одной из ПС 110 кВ в Новосибирске устройства низкоомного заземления нейтрали установлены в кабельно-воздушной сети 10 кВ (рис. 14, *а*, *б*). Техническое решение подтвердило свою эффективность, что иллюстрируется собранными сведениями по снижению количества отключений после ввода резисторов в работу 09.07.2024 (рис. 14, *в*). Для указанной ПС 110 кВ общая протяженность КЛ-10 кВ составляет 34 км, в том числе 5,2% (1,8 км) СПЭ-кабелей, протяженность присоединенных ВЛ – 64,3 км. Емкостные токи с учетом прилегающей сети 10 кВ в нормальной схеме равны 48,5 А и 49,3 А для 1 и 2 секций шин соответственно.

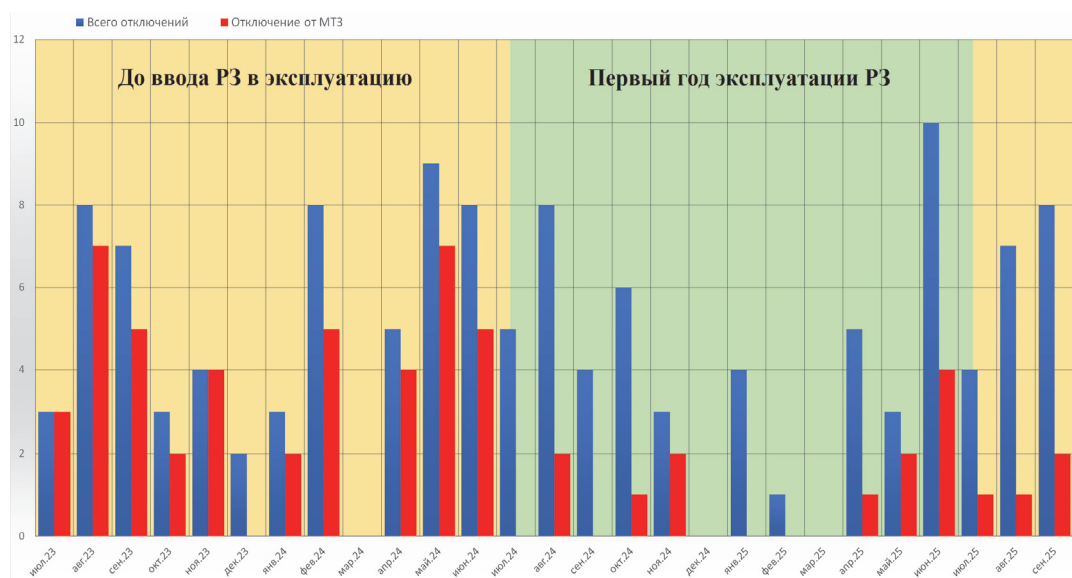


*a*



*б*

*Рис. 14.* Внешний вид (*a*), чертеж (*б*) комплектного устройства и эффект от внедрения (*в*) резистивного заземления нейтрали 30 Ом / 192 А / 10 кВ / 10 с на ПС 110 кВ, Новосибирск



6

Рис. 14. Окончание

Опыт эксплуатации низкоомных резисторов на ПС 110 кВ (рис. 14) без детального разделения по видам отказов показал, что в течение года до установки низкоомных резисторов произошло 70 отключений, причем короткие замыкания составили 71,4% из них, нередко наблюдались веерные отключения линий. В течение года после установки резисторов общее количество отключений снизилось почти на 30% – до 50-ти ед., из которых доля КЗ составила уже 24%, веерные отключения практически прекратились. В абсолютных единицах число отключаемых КЗ сократилось более чем в 4 раза – с 50-ти до 12-ти ед/год. В расчете учитывались только отключения от шин 10 кВ питающего центра. Следует также отметить, что на отходящих ВЛ-10 кВ был сохранен принцип однократного АПВ, поскольку доля успешных включений после кратковременных перекрытий изоляции по одной фазе (что само по себе довольно распространено ввиду конструкции линий) на воздушных участках составляет около 70%.

### Заключение

1. При новом строительстве, реконструкции или модернизации питающих центров 110-220 кВ с секциями шин 6-35 кВ важно с самого начала определить технологию работы сети при замыкании на землю – отключать или удерживать ОЗЗ. Это решение служит основой выбора вида, конструкции и условий применения резистивного заземления нейтрали, разрешенного к применению всей действующей нормативной документации как на федеральном уровне, так и в отраслевых нормах и стандартах организаций.

2. Для хорошо резервированных сетей среднего напряжения, к которым относятся практически все кабельные сети городов, особенно при наличии оборудования с твердой, невосстанавливаемой изоляцией (СПЭ-кабели, литые силовые и измерительные трансформаторы, сухие реакторы), удержание ОЗЗ на время его поиска представляет большую опасность и должно быть исключено посредством быстрого и селективного отключения любой «земли».

3. Основной целью применения резисторов является ограничение перенапряжений и обеспечение требуемых параметров чувствительности и селективности защит от ОЗЗ. Сегодня проектируются и вводятся в работу различные схемы с первичными резисторами: высокоомными, коммутируемыми, низкоомными. Для разных видов сетей (кабельные, воздушные или смешанные), с учетом действующей нормативной документации, можно подобрать оптимальный вариант.

4. Снижение числа аварийных отключений в сети за счет правильного выбора режима нейтрали в целом (вида и схемы включения резисторов в частности) является не только показателем эффективности принятого технического решения, но и способом продления эксплуатационного ресурса оборудования сетей 6-35 кВ. Опыт эксплуатации подтверждает кратное снижение числа аварийных отключений после ввода низкоомных резисторов.

### Литература

1. Базуткин В.В., Кадомская К.П., Костенко М.В., Михайлов Ю.А. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. – СПб.: Энергоатомиздат, 1995. – 320 с.
2. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
3. Саенко Ю.Л., Попов А.С. Влияние характера горения дуги на повреждаемость трансформаторов напряжения контроля изоляции. // Вестник Приазовского государственного технического университета. Вып. 21, 2010. С. 101-106.
4. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
5. Шуин В.А., Добрягина О.А., Кутумов Ю.Д., Шадрикова Т.Ю. Влияние высших гармоник на переходные процессы при дуговых замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. № 2. С. 30-40.
6. Зихерман М.Х. Три способа подавления феррорезонанса в трансформаторах напряжения // Энергоэксперт. 2021. № 1 (77). С. 36-39.
7. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. РД 153-34.3-35.125-99 / Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. 2-ое издание. – СПб.: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 353 с.
8. Мониторинг состояния и техническая диагностика оборудования объектов энергетики: учебное пособие / А. Н. Назарычев, А. А. Пугачёв, А. И. Потапов, С. П. Высокорец; под общей редакцией А. Н. Назарычева. - Санкт-Петербург: ИПЦ Измайловский, 2023. - 331 с.

9. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утв. Приказом Министерства энергетики РФ от 4 октября 2022 г. №1070, введены в действие с 06.03.2023 г.
10. Ильиных М.В., Телегин А.В. Новые Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ // Энергетик. № 11. 2023. С. 3–7.
11. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике», утверждено Советом директоров Общества (протокол от 28.12.2024 № 673).
12. РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87) Типовая инструкция по компенсации емкостного тока в сетях 6-35 кВ.
13. СТП 33240.20.187-24 Электрические сети 6-35 кВ. Резистивное и комбинированное заземление нейтрали. Методические указания по проектированию (введен в действие с 01.05.2024). Стандарт ГПО электроэнергетики «Белэнерго».
14. Стандарт организации СТО-15.05-005 Руководящие указания по выбору режима заземления нейтрали в электрических сетях напряжением 6-35 кВ. Утв. Приказом ПАО «Россети Ленэнерго» от 10.07.2025 № 380.
15. СТО Газпром 2-1.11-070-2006 Методические указания по выбору режима заземления нейтрали в сетях напряжением 6 и 10 кв дочерних обществ и организаций ОАО «Газпром».
16. Ильиных М.В., Телегин А.В. Российские и мировые стандарты по организации режима заземления нейтрали распределительных сетей и защите от дуговых перенапряжений // Промышленная энергетика. № 11. 2023. С. 12–20.
17. Беляков Н.Н. Перенапряжения от заземляющих дуг в сетях с активным сопротивлением в нейтрали. // Труды ВНИИЭ. 1961. Вып. 11. С. 84 – 101.
18. Сазонов В.Н. Комбинированное заземление нейтрали сетей 6-35 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 1 (40). С 44-47.
19. Ширковец А., Козлачков М., Сазонов В., Хадыев И., Дмитриев И., Панкратов Г., Тимошенко С. Комбинированное заземление нейтрали. Фактор повышения эксплуатационной надежности сетей 6–35 кВ // Новости Электротехники. 2016. № 5(101). С. 18–21., № 6(102). С. 2–7.
20. Опыт применения резистивного заземления нейтрали в сетях 6-20 кВ в ПАО «Россети Ленэнерго»/ Соловьев Н., Рябокучма Я., Щербаков М. и др. // Электроэнергия. Передача и распределение. Спецвыпуск, 2025. №3 (38). С. 30-25. Электронный источник URL <https://eepir.ru/article/opyt-primeneniya-rezistivnogo-zazemleniya-nejtrali-v-nbsp-setyah-6-20-nbsp-kv-v-nbsp-pao-nbsp-rosseti-lenenergo/#>
21. Ширковец А.И. Герасимов В.Е. Стратегия сбережения ресурса электрооборудования на основе локализации однофазных замыканий в кабельных сетях среднего напряжения // Энергия единой сети. 2025. № 2 (77). С. 24–36.
22. Требования к релейной защите и автоматике различных видов и ее функционированию в составе энергосистемы, утв. Приказом Минэнерго России от 10.07.2020 №546п. Электронный источник URL <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minenergo-rossii-ot-10072020-n-546-ob-utverzhenii/>
23. Львов М.Ю., Челазнов А.А., Долгов А.С. Зотов С.С. Технологическое проектирование электрических сетей напряжением 20 кВ мегаполиса. // Энергия единой сети. 2024. №3 - 4 (74). С. 18-29.