



**Авторы:**  
**Телегин А.В.,**  
**Ширковец А.И.**  
 ООО «Болид»,  
 г. Новосибирск, Россия

Telegin A.V.,  
 Shirkovets A.I.  
 LLC Bolid,  
 Novosibirsk, Russia

**Abstract:**  
 The paper describes methods of neutral grounding in medium

# ПРОБЛЕМАТИКА ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ И РЕЖИМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ СТРАН ЕВРОПЫ И АМЕРИКИ

## SINGLE PHASE-TO-GROUND FAULTS AND NEUTRAL GROUNDING IN MEDIUM VOLTAGE NETWORKS IN EUROPEAN AND AMERICAN COUNTRIES

Аннотация: в статье представлены способы заземления нейтрали в сетях среднего напряжения некоторых европейских и американских стран, анализируются их основные преимущества и особенности реализации. Для сетей с компенсацией емкостного тока определяются предельные токи самогашения дуги на основе немецкого стандарта VDE 0228-2:1987. Приводится сравнение высокоомного и низкоомного заземления нейтрали в соответствии с указаниями стандарта IEEE Std 142-2007. Рассматриваются режимы заземления нейтрали и способы подавления замыканий на землю, которые мало распространены в России.

Ключевые слова: режим заземления нейтрали, глухое заземление нейтрали, изолированная нейтраль, высокоомное заземление нейтрали, низкоомное заземление нейтрали, однофазное шунтирование, компенсация остаточного тока, предельный ток самогашения

voltage networks in European and American countries with the analysis of their advantages and implementation. For networks with capacitance current compensation, self-extinguishing current limits are determined according to German standard DIN VDE 0228-2:1987. The comparison between high-resistance and low-resistance grounding in accordance with IEEE Std 142-2007 is presented. Methods of neutral grounding and ways of ground fault current suppression which is not popular in Russia are considered.

**Keywords:**  
 neutral grounding, solid grounding, ungrounded systems, high-resistance grounding, low-resistance grounding, one phase shunting, residual current compensation, self-extinguishing current limit

### Введение

К настоящему времени накоплен значительный опыт эксплуатации сетей среднего напряжения (6-35 кВ в России, 1-69 кВ за рубежом) с различными режимами заземления нейтрали. Однако вопрос выбора оптимального способа заземления нейтрали для конкретной сети в России зачастую решается исключительно на основе устоявшейся практики проектирования, опирающейся на устаревшие положения отраслевых нормативных документов. Между тем в развитых странах Европы и Америки принята практика обобщения опыта эксплуатации, проведения полевых испытаний, создания уточненных математических моделей и, при необходимости, актуализация и корректировка нормативных положений по результатам таких комплексных исследований. Это позволяет на современном уровне решать многофакторную задачу оптимизации режима нейтрали, влияющего на виды и параметры возникающих замыканий, ток в месте замыкания и перенапряжения на неповрежденных фазах, логику работы релейной защиты от замыканий на землю, безопасность персонала при

однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ). Основанные на многочисленных исследованиях рекомендации по расчету, схемным решениям и выбору оборудования для заземления нейтрали отражены в ряде национальных и международных стандартов МЭК, CENELEC, DIN VDE, IEEE, ANSI и др.

Не следует, однако, считать, что Россия серьезно отстает в решении задачи защиты оборудования при замыканиях на землю: в этой тематике и сегодня ведутся серьезные исследования и активно разрабатываются и внедряются новые нормативно-технические документы, правда, пока в формате стандартов организаций. В числе последних – ОАО «Газпром», ОАО «АК «Транснефть», ОАО «МРСК Волги» и «МРСК Сибири».

В настоящей статье рассматриваются особенности различных способов заземления нейтрали согласно нормам зарубежных стандартов, приводятся предлагаемые к использованию методы и средства для решения задач подавления ОЗЗ и минимизации их последствий в электрических сетях среднего напряжения некоторых стран мира.



### Сети с глухим заземлением нейтрали

По определению ANSI/IEEE 100 [1], глухим (эффективным) заземлением нейтрали считается при совместном выполнении условий  $X_0/X_1 \leq 3\%$  и  $R_0/R_1 \leq 3\%$ , где  $X_0, R_0$  – активное и реактивное сопротивление нулевой последовательности, а  $X_1, R_1$  – активное и реактивное сопротивление прямой последовательности. На практике это означает, что сопротивление между нейтральной точкой сети и заземляющим контуром пренебрежимо мало. В результате токи при замыкании на землю могут быть различной величины – от очень малых до превышающих ток трехфазного КЗ. Амплитуда тока зависит от конфигурации сети, места замыкания и сопротивления в месте замыкания. Поскольку уровень тока составляет в этом случае сотни и тысячи ампер, упрощается задача локализации места замыкания и селективного отключения поврежденного участка.

В России, в соответствии с требованиями ПУЭ, глухое заземление нейтрали в сетях среднего напряжения не применяется.

Что касается зарубежных стран, то глухое заземление нейтрали широко применяется в электрических сетях США, Канады, Австралии и Великобритании. Однако в этих сетях реализованы четырехпроводные сети 4-25 кВ, когда четвертый нулевой проводник протягивается вдоль всей длины воздушной линии. Это используется для максимального сокращения суммарной длины низковольтной сети 120 В. Кроме указанных стран, глухое заземление нейтрали применяется в Португальской Распределительной Сети (Portuguese Transmission Network), поскольку большинство трансформаторов (400/63 кВ, 220/63 кВ и 150/63 кВ) и автотрансформаторов (400/220 кВ и 400/150 кВ) работают в режиме глухозаземленной нейтрали и по стороне 63 кВ.

### Сети с изолированной нейтралью

В сетях с изолированной нейтралью нет преднамеренного соединения нейтральной точки сети с «землей». Однако всегда существуют емкостные связи между разноименными фазами сети и различными цепями, а также между каждым проводником и «землей». Следовательно, сеть оказывается связанной с «землей» через распределенную емкость (емкостное сопротивление) нулевой последовательности фазных проводников.

В сетях с изолированной нейтралью токи замыкания на землю на 90% или более определяются емкостью линий на «землю». Эквивалентная емкость линий зависит от типа, сечений проводников и длин линий, присоединяемых в единой, гальванически связанной сети.

В сетях с изолированной нейтралью возможно возникновение опасных для изоляции перенапряжений в повторных циклах зажигания и гашений дуги при замыкании на землю. Эти перенапряжения, которые могут в несколько раз превышать напряжения нормального режима, являются фактически результатом резонансных явлений в эквивалентной схеме «индуктивное сопротивление системы – распределенная емкость относительно земли». Опыт эксплуатации показывает, что эти перенапряжения могут вызывать множественные (многоместные и междуфазные) повреждения изоляции оборудования, что характерно для электродвигателей и элементов кабельных линий. Переходные перенапряжения в результате повторных дуговых пробоев фазной изоляции на землю, а также их последствия являются основным мотивом отказа от режима изолированной нейтрали. Чтобы снизить уровни перенапряжений при повторных замыканиях на землю, необходимо обеспечить заземление нейтрали через активное или реактивное сопротивление.

В этой связи, с точки зрения задачи минимизации повреждений оборудования, интересен тот факт, что в 2011-

2012 гг. для ряда новых промышленных предприятий Финляндии были спроектированы сети 20 кВ с изолированной нейтралью, но из-за очень частых повреждений этих сетей пришлось вернуться к низкоомному заземлению нейтрали, широко используемому ранее в подобных схемах.

Режим изолированной нейтрали до сих пор широко используется в России, и при суммарной протяженности распределительных сетей более 1 миллиона километров значительная их доля (до 70% сетей 6-35 кВ в зависимости от региона) эксплуатируется именно с этим режимом. Однако известные недостатки сетей с изолированной нейтралью привели к тому, что в большинстве европейских и некоторых других странах мира режим изолированной нейтрали исключен из практики эксплуатации. Есть и исключения: например, в соответствии с «Энергетическим стандартом Латвии» (Energy standard of Latvia) изолированная нейтраль должна применяться в электрических сетях 20 кВ, независимо от типа линий, если ток однофазного замыкания на землю не превышает 15 А [2]. При возрастании тока замыкания на землю повышается вероятность перехода однофазного замыкания на землю в двухфазное, которое приводит к отключению двух и более фидеров и перебою энергоснабжения потребителей на длительное время.

### Сети с компенсированной нейтралью

При использовании режима компенсированной нейтрали, в нейтральную точку сети подключается реактивное сопротивление (реактор). При этом ток ОЗЗ может быть скомпенсирован полностью или частично, в зависимости от качества настройки и типа ДГР (ступенчатый, плунжерный, с подмагничиванием), состава тока замыкания на землю (доля активной составляющей, наличие высших гармоник), а также вида замыкания (переключающееся дуговое, «металлическое», через переходное сопротивление и пр.).



**Заземление нейтрали через реактивное сопротивление – альтернатива глухому заземлению**

Ток замыкания на землю, протекающий в контуре нулевой последовательности, в системе с заземлением нейтрали через реактивное сопротивление зависит от значения этого сопротивления. Поэтому амплитуда тока ОЗЗ рассматривается в качестве критерия при описании уровня (*степени*) заземления, что используется, например, в распределительных сетях США [3]. В такой системе ток замыкания на землю должен составлять от 25% ( $X_0 = 10X_1$ ) до 60% ( $X_0 = 3X_1$ ) от тока трехфазного КЗ, чтобы предотвратить появление опасных перенапряжений в переходном процессе. Сопротивление  $X_0$  представляет собой сумму реактивного сопротивления нулевой последовательности источника питания  $X_{0ист}$  и утроенного реактивного сопротивления заземления  $3X_n$  ( $X_0 = X_{0ист} + 3X_n$ ). В данном случае ток замыкания на землю получается значительно выше, чем величина желаемого тока замыкания для системы с резистивным заземлением нейтрали, поэтому заземление нейтрали через реактивное сопротивление не может являться альтернативой заземлению сети через низкоомное сопротивление.

Заземление нейтрали через реактивное сопротивление в США обычно используется в случаях, когда требуется ограничить ток замыкания на землю до величины, близкой к амплитуде тока трехфазного короткого замыкания [3].

Заземление нейтрали через реактивное сопротивление используется в некоторых случаях в Португальской Распределительной Сети (Portuguese Transmission Network) напряжением 63 кВ. С целью ограничения несимметричного тока замыкания, в нейтраль трансформаторов включается реактивное сопротивление такого номинала, чтобы ограничить этот несимметричный ток и обеспечить коэффициент замыкания на землю не более 1,4.

**Резонансное заземление нейтрали (заземление через дугогасящий реактор) – альтернатива изолированной нейтрали**

В сетях с компенсацией емкостного тока заземление нейтрали осуществляется через дугогасящий реактор или, по зарубежной терминологии, катушку Петерсена. При таком режиме нейтрали основным преимуществом полагается создание условий для гашения дуги однофазного замыкания на землю и его самоликвидации. Это обеспечивается за счет снижения величины тока замыкания на землю через переходное сопротивление и ограничения перенапряжений до  $(2,4-2,6)U_{\phi}$ , где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети. При этом режиме заземления нейтрали не требуется отключения поврежденного участка сети.

Заземление нейтрали через дугогасящий реактор довольно редко применяется в сетях США, однако часто используется в распределительных сетях Великобритании, Германии, Австрии и других европейских стран [3]. Ключевой особенностью этого способа заземления нейтрали является то, что резонансный контур должен быть перенастроен, если произойдет изменение распределенных параметров связанного с ним контура нулевой последовательности защищаемой сети (например, за счет отключения линий). Достигнуть наилучшего эффекта от применения ДГР можно либо в сети с минимальным изменением конфигурации, что, например, для городских кабельных сетей невозможно в принципе, либо – за счет обеспечения правильной и быстрой работы автоматики управления реактором, в том числе при «сложных» видах ОЗЗ.

На сегодняшний день, во многих европейских странах, например, в Латвии [2], защита от замыканий на землю основана на компенсации тока замыкания дугогасящим реактором (катушкой Петерсена). Эффект самогашения дуги с помощью ДГР хорошо проявляется в сети с воздушными линиями (ВЛ) электропередачи, что подтверждено, например, опытом эксплуатации реакторов в сетях ОАО «Тюменьэнерго». В ряде случаев наличие ДГР также предотвращает переход однофазных замыканий при грозовых поражениях ВЛ 10 кВ в междуфазные КЗ и снижает количество аварийных отключений в грозовой

сезон. Однако это явление связано прежде всего с возможностью полного самовосстановления электрической прочности воздушной изоляции после погасания дуги. Но при использовании ДГР в кабельных сетях возникает вопрос о целесообразности удержания ОЗЗ, исходя из следующих соображений:

- во-первых, полимерная кабельная изоляция (сшитый полиэтилен и этиленпропиленовая резина) не способна к самовосстановлению после пробоя. Происходит расширение области повреждения, и однофазное замыкание переходит в междуфазное КЗ, что в приводит к отключению поврежденного фидера, за время от 0,5-0,7 с до 1 минуты.
- во-вторых, даже при успешном гашении дуги ОЗЗ в бумажно-пропитанной изоляции кабеля формируется локально ослабленная, дефектная область, в которой наиболее вероятно произойдет пробой при последующих замыканиях, даже в перспективе от нескольких минут до нескольких месяцев.

В настоящее время в распределительных сетях при реконструкции воздушных линий распространена их замена на кабельные, применение кабельных вставок, а также формирование смешанных кабельно-воздушных сетей с переходами ВЛ-КЛ-ВЛ и обратно. Поэтому дугогасящие реакторы, компенсирующие только емкостную составляющую тока замыкания, с усложнением состава оборудования, изменением конфигурации сети и присоединением новых, в том числе нелинейных потребителей, становятся значительно менее эффективными.

Компенсация емкостных токов с помощью ДГР осуществляется в сетях среднего напряжения Испании (10-30 кВ), Франции (12-24 кВ), Италии (10-20 кВ), Германии (10-20 кВ), Австрии (10-30 кВ), Швейцарии (10-20 кВ), Финляндии (20 кВ), Швеции, Норвегии, Чехии и Словакии. При этом ДГР производят всего в четырех странах мира (за исключением РФ и Беларуси): Австрия (TRENCH), Чехия (EGE), Китай (JUNFA), Индия (филиал TRENCH).

Кроме указанных режимов заземления нейтрали в Германии, Чехии



и некоторых других странах применяется также комбинация (параллельное включение) дугогасящего реактора и резистора: ДГР обеспечивает гашение кратковременных однофазных перекрытий изоляции на землю, а низкоомный резистор подключается к нейтрали сети параллельно реактору только кратковременно специальным однофазным силовым выключателем. Резистор в такой схеме служит исключительно для селективного определения фидера с устойчивым однофазным замыканием на землю. Такие известные зарубежные производители ДГР, как «TRENCH» (Австрия, реакторы END, ELD, EDD) и «EGE» (Чехия, реакторы ZTC и ASR) реализуют указанный способ заземления подключением низкоомного резистора к дополнительной обмотке ДГР. Такой способ включения резистора служит исключительно для выявления поврежденного фидера и не решает главной задачи – снижения перенапряжений в моменты замыкания на землю. Между тем при расстройках компенсации, возникающих в процессе развития дугового замыкания, дополнительное устройство подавления импульсных перенапряжений (в частности, высоко-

омный резистор, постоянно включенный параллельно ДГР) может сыграть решающую роль в снижении повреждения оборудования.

Компенсация емкостного тока также часто используется в распределительных сетях Финляндии, главным образом из-за необходимости сохранения питания потребителей при ОЗЗ. Такое решение является тем более оправданным, что на напряжении 20 кВ эксплуатируется большое количество воздушных сетей.

В настоящее время в сетях среднего напряжения многих европейских стран, как и в России, особенно актуальной становится задача компенсации больших (100-200 А и более) токов замыкания на землю и связанная с ней проблема ограничения активных и реактивных составляющих тока до уровня, обеспечивающего самогашение дуги при ОЗЗ.

Зарубежные исследования позволяют заключить, что предельные токи самогашения дуги в сети с компенсацией могут оказаться существенно выше приведенных в отечественном ПУЭ значений 10-30 А. В публикации [4] для сетей 20 кВ с компенсацией предлагаются следующие значения предельных остаточных токов ОЗЗ, при которых еще возможно самогашение дуги:

$$I_{OCT} = \begin{cases} 60 \text{ А, если } I_C \leq 240 \text{ А;} \\ 30 + 25 \frac{I_C}{200}, \text{ если } I_C > 240 \text{ А.} \end{cases} \quad (1)$$

Предельные значения токов самогашения, определенные в разное время на основе работ Х. Розера, М. Эриха, Г. Хайнце, К. Коха, Д. Полла, составили 200-1150 А при емкостном характере остаточного тока и 70-210 А – при активном. В действующем западноевропейском стандарте VDE 0228-2:1987 на основе проведенных в разное время исследований согласно (1) установлены пределы тока самогашения для сетей разного класса напряжения с различными режимами нейтрали (рис. 1) [4].

Как видно из рис. 1, значения токов, определенные по кривым для сетей классов напряжения 6-10 кВ, составят 35 А (изолированная нейтраль) и 60 А (ком-

пенсация тока замыкания). Первое значение оказывается на 17% и 75% выше, чем указано в ПУЭ для сетей 6 и 10 кВ соответственно. Второе значение тока (60 А) не имеет аналога в отечественной технической документации. Для сети 35 кВ ток самогашения составит 40-42 А при изолированной нейтрали (в ПУЭ – 10 А) и 68-70 А – в сети с компенсацией. Очевидно, концепция определения предельного тока замыкания, который может погаснуть при дуговом замыкании на землю, существенно отличается в отечественной и зарубежной литературе.

Однако О. Майер еще в 1950 г. отметил, что для успешного погашения дуги, кроме остаточного тока замыкания на землю, необходимо рассматривать также и влияние восстанавливающегося напряжения  $U_{ВОССТ}$  форма огибающей которого и определяет итог горения дуги при ОЗЗ. Для сетей с компенсацией емкостного тока (значительная часть кабельных сетей 6-35 кВ) Д. Полл предлагает  $U_{ВОССТ}$  рассчитывать как:

$$\frac{du_{ВОССТ}}{dt} = u_{\phi MAX} \frac{\omega}{2} \sqrt{(2\sqrt{1+v}-2)^2 + \delta^2} \quad (2)$$

где  $\omega$  – круговая частота сети;  $\delta$  – коэффициент демпфирования;  $v$  – степень расстройки компенсации.

Для сетей с малыми токами замыкания (до 10-15 А) характеристика  $U_{ВОССТ}$  является более существенной в плане оценки возможности гашения дуги в каждом пробое. Следует отметить, что наклон огибающей  $U_{ВОССТ}$  рассчитываемого по (2), отличается для одинаковой величины расстройки компенсации в случае пере- или недокомпенсации: в случае перекомпенсации он больше, чем в случае недокомпенсации.

Время горения дуги с учетом экспериментальных исследований [4] предлагается определять согласно выражению:

$$t_{ДГТ} = 0,02 \cdot \exp\left(\frac{9,2}{I_C} \cdot I_{OCT}\right) \quad (3)$$

Можно показать, что для наборов соотношений  $I_{СТ}$  и  $I_C$  согласно (3), с учетом формулы (1), время горения

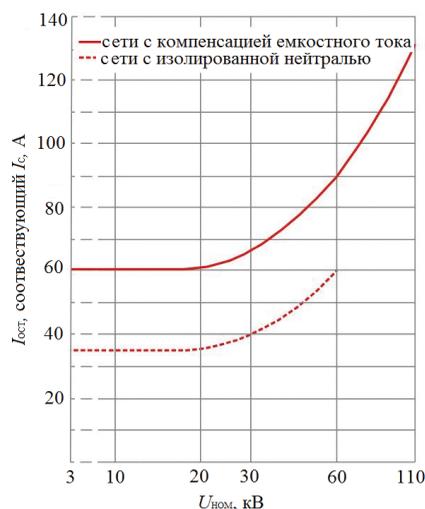


Рис. 1. Предельные токи самогашения дуги по отношению к токам ОЗЗ в зависимости от номинального напряжения распределительной (воздушной или кабельно-воздушной) сети согласно немецкому стандарту VDE 0228-2:1987



дуги составит как минимум  $t_{\text{ДУГ}} = 0,2$  с в сети с компенсацией и предельными значениями  $I_C = 240$  А,  $I_{\text{ОСТ}} = 60$  А и будет расти по мере приближения значения  $I_C$  к  $I_{\text{ОСТ}}$  ( $t_{\text{ДУГ}}$  увеличивается на 10% при снижении  $I_C$  на 10 А). Подобная зависимость имеет место и для сети с изолированной нейтралью. Результаты экспериментов, проведенных за рубежом, однако, свидетельствуют, что  $t_{\text{ДУГ}} = 0,02 - 1,4$  с для  $I_{\text{СТ}} = 10 - 80$  А.

### Сети с резистивным заземлением нейтрали

Резистивное заземление нейтрали – один из наиболее широко используемых режимов нейтрали за рубежом. Методические основы применения резистивного заземления нейтрали приведены в стандартах IEEE Std 142-1991 и замещающем его IEEE Std 142-2007 [3]. В редакции этого стандарта 1991 г. указано, что при высокоомном заземлении нейтрали «значение тока замыкания на землю не превышает обычно 10 А», а при низкоомном – «сопротивление резистора выбирается с учетом обеспечения желаемого тока релейной защиты». Последнее замечание продублировано при пересмотре IEEE Std 142-2007 г.: «допускается протекание токов замыкания на землю большей величины, обычно в пределах 100-1000 А, с целью обеспечения желаемого тока для селективной работы релейной защиты».

В действующей же редакции IEEE Std 142-2007 [3] граница между высокоомным и низкоомным заземлением нейтрали определена с помощью отношения тока ОЗЗ при наличии резистора к току трехфазного КЗ конкретной сети. Низкоомным заземлением нейтрали считается, если  $I_{R\_OЗЗ} \geq 0,2I_{KЗ}^{(3)}$  (до 100-1000 А). Если же  $3I_{C0} \leq I_{R\_OЗЗ} \leq 0,01I_{KЗ}^{(3)}$  то это высокоомное заземление нейтрали. При высокоомном заземлении нейтрали ток от резистора в режиме однофазного замыкания на землю обычно принимается на уровне  $I_R = (0,7 - 1,2)I_C$ .

Следует отметить, что согласно IEEE Std 142 (обеим редакциям) значение тока замыкания 10 А соответствует режи-

му его длительного протекания без повреждения оборудования, поэтому не может служить границей между высокоомным и низкоомным заземлением нейтрали сети.

В полном соответствии с рекомендациями Петерсена (1916 г.) в распределительных сетях США значение сопротивления высокоомного резистора выбирается таким образом, чтобы  $I_R \approx I_C$ . Это обеспечивает снижение напряжения на нейтрали в бестоковую паузу практически до нуля, и задача ограничения перенапряжений до  $2,5U_{\Phi}$  успешно решается. При этом активный ток через высокоомный резистор составляет обычно от 1 до 25 А, а практически не более 10 А [5].

При низкоомном резистивном заземлении, по сути являющемся адекватной альтернативой глухому заземлению нейтрали, ток замыкания на землю обычно ограничивается до 50-600 А по первичной стороне [5], что обеспечивает селективную работу релейной защиты. Для проектируемых и вновь строящихся сетей такое решение обуславливает существенный экономический эффект, поскольку в ряде случаев может быть использовано оборудование, рассчитанное не на линейное, а на фазное напряжение.

Отметим, что в электрических сетях горнодобывающих предприятий США используется также «средне-высокоомное» заземление (medium-high-resistance) нейтрали [5]. В этих сетях особое внимание уделяется вопросу электробезопасности и защиты персонала, поэтому ток замыкания ограничивается до 25-50 А по первичной стороне. Все передвижное оборудование (например, шагающие экскаваторы) запитывается от сети отдельного фидера, нейтраль которой заземляется через резистор на расстоянии не менее 15 метров от питающей подстанции. Для обнаружения замыкания и отключения поврежденного фидера, без локализации места повреждения, применяются микропроцессорные защиты с нулевой выдержкой времени. При этом системы аварийного освещения, вентиляции, пожаротушения (системы жизнеобес-

печения), питаются от независимых подстанционных фидеров с обеспечением соответствующей категорией надежности электроснабжения [5].

Оценка мировой практики свидетельствует, что резистивное заземление нейтрали – наиболее широко применяемый способ, применяемый в сетях среднего напряжения зарубежных промышленных предприятий и распределительных объектах электросетевого комплекса Японии, Австралии, США, стран Западной, Северной и Восточной Европы. Поэтому резисторы для заземления нейтрали выпускаются более чем на пятидесяти предприятиях во всем мире: в США («Jenkins», «Post Glover»), Канаде («Avtron», «ICP»), Италии («Telega»), Германии («Gino ESE»), Франции («Areva»), Японии («Miluoki Resistor»), Южной Кореи («Rara Electronic Corporation»), Турции («Hilkar»), Индии («National Resistors Onies»), и т.д. Особенности производимых и применяемых за рубежом высоковольтных резисторов являются малое номинальное время работы (обычно до 3 с) и высокая температура нагрева токопроводящих элементов (до 760 °С), выполняемых из металлических сплавов. Этим обусловлены соответствующие ограничения по количеству и длительности выдерживаемых (т.е. отключаемых) ОЗЗ. Указанных недостатков лишены низкоомные резистивные установки на основе электропроводящих композиционных материалов (например, ЭКОМа), номинальное время работы которых составляет от десятков до сотен секунд, а температура на поверхности резистивных элементов не превышает 120-130 °С.

Резистивное заземление осуществляется с помощью имеющихся или вновь устанавливаемых трансформаторов [6]. Задействуется обмотка «звезда» с выведенной нейтралью или применяется трансформатор с первичной обмоткой, соединенной в «зигзаг» (рис. 2). При этом трансформатор со схемой «звезда с выведенной нейтралью – треугольник» используется только для организации нейтральной точки. В [5] приведен пример заземления нейтрали через трансформа-

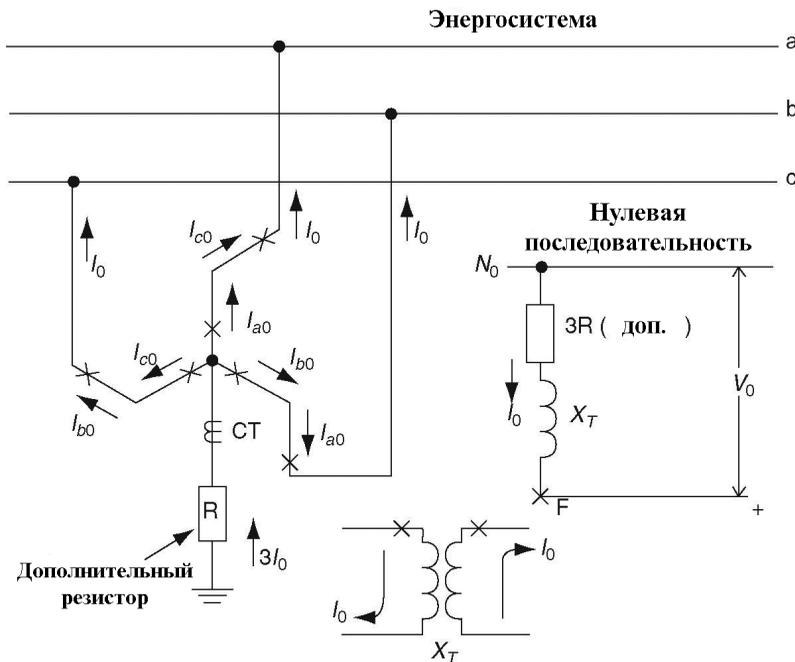


Рис. 2. Низкоомное заземление нейтрали с использованием заземляющих трансформаторов с первичной обмоткой, соединенной в «зигзаг»

тор, первичная обмотка которого соединена в «зигзаг», подобно отечественным нейтраллерам типа ФМЗО производства ОАО «РЭТЗ «Энергия» и ФЗМ производства ОАО «ХК «Электрозавод». Активное сопротивление маломощного (до 1000 кВА) трансформатора с первичной обмоткой «зигзаг» крайне мало, однако за счет реактивного сопротивления рассеяния ток подключенного резистора может несколько ограничиваться (как правило, не более чем на 3-5%) (рис. 2).

Ниже рассмотрен пример расчета низкоомного заземления нейтрали для сети 13,8 кВ через активное или реактивное сопротивление (рис. 3) [5]. Заземляющий реактор, устанавливаемый в выведенную нейтраль трансформатора 115/13,8 кВ мощностью 20 МВА, используется для ограничения тока при однофазном замыкании на землю до 400 А по стороне 13,8 кВ. При этих условиях необходимое реактивное сопротивление устройства в нейтрали равно 19,4 Ом, активное – 19,9 Ом.

В Финляндии резистивный способ заземления нейтрали используется в основном в сетях электроснабжения промышленных предприятий. Сопротивление резистора также выбирается из условия  $I_R \approx I_C$ . Это гарантированно предупреждает возникновение недопустимо высоких перенапряжений при неустойчивых замыканиях на землю. В кабельных сетях Финляндии оптимальным режимом нейтрали считается почти исключительно низкоомное резистивное заземление, поскольку повсеместное применение кабелей с твердой полимерной изоляцией не предполагает возможности самоустранения ОЗЗ, после пробоя требуется восстановление поврежденного участка КЛ.

В последние годы низкоомное резистивное заземление нейтрали внедряется в кабельных сетях 10 кВ в Латвии, главным образом в Риге [2]. Нейтраль сети заземляется через очень малое сопротивление, обычно не более 5 Ом. В результате ток замыкания на землю значительно возрастает (вплоть до 1000 А), что обеспечивает селективность срабатывания релейной защиты для отключения поврежденного кабеля. Кроме того, в этой ситуации можно быстро локализовать поврежденный участок с помощью простых индикаторов

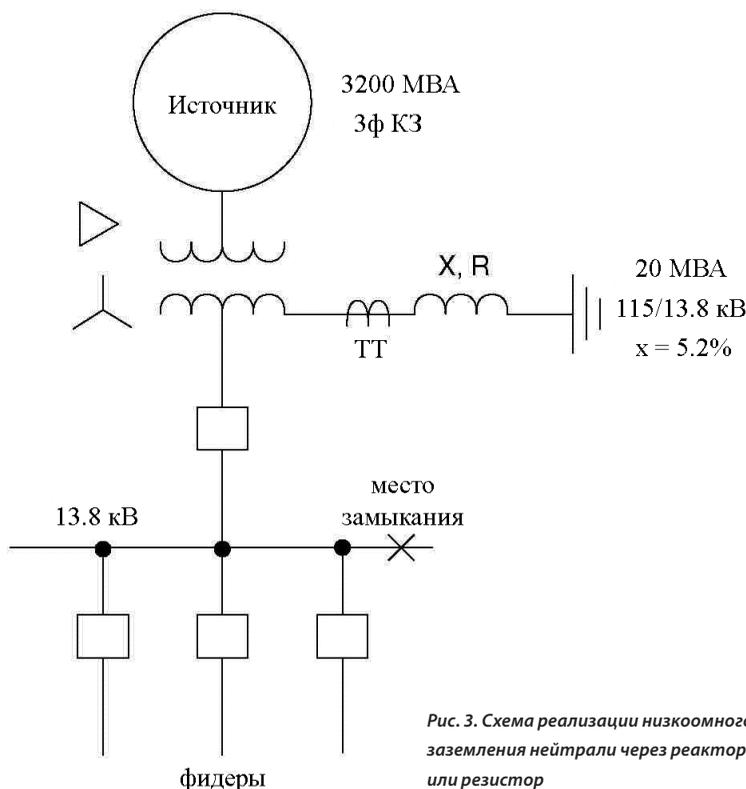


Рис. 3. Схема реализации низкоомного заземления нейтрали через реактор или резистор



(указателей) замыканий и восстановить подачу электроэнергии потребителям. Вероятность перехода однофазного замыкания в КЗ при этом достаточно мала. Недостатком этого режима заземления нейтрали является неизбежное отключение кабельной линии вместе со всеми подключенными потребителями, поэтому его реализация может встретить организационные сложности, связанные с требованием обеспечения категории надежности со стороны потребителя. Эта задача может быть решена с помощью внедрения средств быстродействующего АВР, а также оснащения всех распределительных пунктов и подстанций прилегающей сети кабельными ТТНП и релейными защитами от ОЗЗ.

Следует отметить, что в случае объединения схем подстанций с низкоомным заземлением нейтрали и подстанций с изолированной или компенсированной нейтралью на параллельную работу, релейная защита подстанции с низкоомным заземлением нейтрали может работать некорректно. Поэтому таких режимов в эксплуатации следует избегать.

Кроме рассмотренных выше, в европейских странах применяются еще два способа заземления нейтрали [2, 7-16]:

- однофазное шунтирование однополюсным заземляющим выключателем;
- резонансное заземление нейтрали с компенсацией остаточного тока.

Рассмотрим указанные способы подробнее.

### Однофазное шунтирование однополюсным заземляющим выключателем

С увеличением длин линий и тока замыкания на землю затрудняется выполнение условий по электробезопасности (ограничение напряжения прикосновения и шагового напряжения), а также повышается вероятность переходов ОЗЗ в многоместные повреждения и междуфазные КЗ.

Одним из вариантов предупреждения негативных последствий от замыканий на землю является использование однополюсного заземляющего выключателя, установленного в центре питания (на «головной» подстанции). При возникновении в произвольной точке сети однофазного замыкания на землю, с помощью микропроцессорных устройств релейной защиты осуществляется определение поврежденного фидера и аварийной фазы. Следующим шагом является глухое заземление поврежденной фазы в центре питания однополюсным выключателем, срабатывающим с минимально возможной выдержкой времени. Примерная схема реализации указанного алгоритма представлена на рис. 4. Главным преимуществом такого решения является обеспечение минимальной скорости роста восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе и, вследствие этого, ликвидация повторных пробоев. Дуга ОЗЗ гаснет при ближайшем переходе тока через ноль.

Моделирование переходного процесса в схеме с шунтированием ОЗЗ показывает, что после включения однополюсного заземляющего выключателя амплитуда  $U_{\text{ВОССТ}}$  пробитой фазы не превышает 200-400 В [2], поэтому вероятность повторных пробоев кабельной изоляции существенно снижается.

Как показали натурные эксперименты с организацией «металлических» замыканий на землю и их последующим шунтированием в сети 8 кВ на питающих подстанциях энергетической компании «Regionalwerke AG Baden» (Швейцария) [7], при токе ОЗЗ до 60 А результаты полевых испытаний хорошо согласуются с теоретическими положениями. Искусственное создание второй точки замыкания посредством включения заземляющего выключателя приводит к тому, что напряжение поврежденной фазы становится строго равным нулю, а на неповрежденных фазах – возрастает в  $\sqrt{3}$  раз. Подобные исследования с шунтированием дуги ОЗЗ в изоляции силовых кабелей, проведенные в тех же сетях [7], подтвердили факт отсутствия повторных пробоев аварийной фазы кабеля. Чем меньше выдержка времени на включение заземляющего выключателя после локализации ОЗЗ, тем ниже оказывается степень повреждения кабеля.

Отметим ключевые преимущества использования метода шунтирования замыкания на землю однополюсным заземляющим выключателем:

- во-первых, при включении заземляющего выключателя не протекает ток в месте замыкания, за счет чего предотвращается дальнейшее разрушение оборудования;
- во-вторых, уровни перенапряжений на неповрежденных фазах ограничиваются линейным напряжением сети, что снижает риск переходов ОЗЗ в междуфазные КЗ;
- в-третьих, улучшаются условия электробезопасности, поскольку значения напряжения прикосновения и шагового напряжения, как правило, не превышают допустимых уровней.

Таким образом, зарубежные исследования подтвердили практическую при-

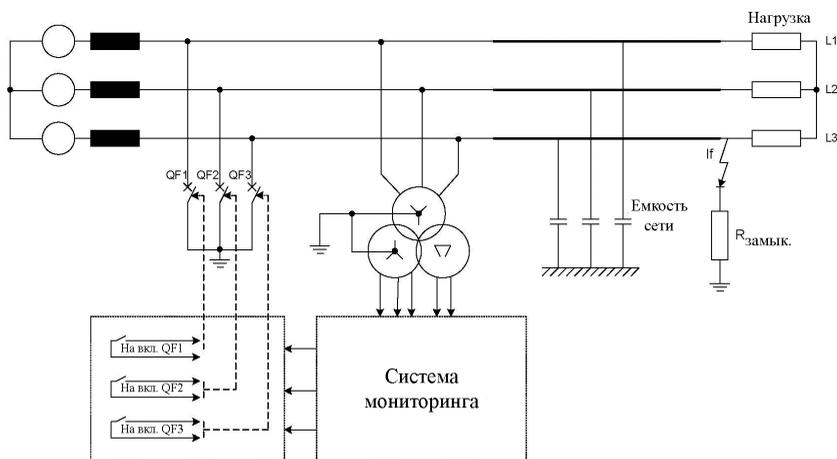


Рис. 4. Примерная схема шунтирования замыкания на землю однополюсными выключателями



менимость рассматриваемого метода шунтирования замыканий на землю однополюсным заземляющим выключателем. Тем не менее, следует отметить некоторые проблемы, возникающие при его реализации. В случае небольшого сопротивления в месте замыкания, когда часть тока нагрузки поврежденной фазы будет протекать через заземляющий выключатель и землю в место замыкания, а часть – к нагрузке, возможно увеличение тока в точке однофазного повреждения по сравнению с ожидаемым значением этого тока. При малых значениях переходного сопротивления в точке однофазного повреждения через место замыкания может протекать более 50% тока нагрузки [7]. Несмотря на это, возможность использования метода шунтирования ОЗЗ с помощью однополюсных заземляющих выключателей (пока, правда, в неопределенной перспективе), уже рассматривается применительно к сетям 20 кВ латвийской энергетической компании «Латвэнерго» [2].

Подчеркнем, что идея шунтирования ОЗЗ, прошедшая в 2008-2010 гг. полевые испытания в Швейцарии, далеко не нова. Этот способ заземления нейтрали был предложен еще в 1975 г. В.Л. Георгиевским при ре-

шении задачи определения поврежденного фидера при замыканиях на землю. Он предложил увеличить ток в точке замыкания до уровня тока двухфазного КЗ с помощью специального заземляющего выключателя искусственного «металлического» замыкания на землю на шинах подстанции, которое по времени будет синхронизировано с моментом возникновения реального замыкания в сети [8]. Аналогичный по сути и содержанию способ предлагается и китайскими учеными [9] для гашения дуги однофазного замыкания на землю. Констатируется, что при использовании специально смонтированного на подстанции заземляющего выключателя с фазным управлением коммутацией можно отвести емкостный ток от места замыкания и погасить дугу в точке возникновения ОЗЗ.

**Резонансное заземление нейтрали с компенсацией остаточного тока замыкания**

Крайне перспективным для широкого применения представляется режим нейтрали, обеспечивающий не просто компенсацию емкостной составляющей тока ОЗЗ частоты 50 Гц, но и максимально

полное подавление остаточного тока в месте повреждения, включая его активную, реактивную и высшие гармонические составляющие [10]. Схема реализации такого режима нейтрали приведена на рис. 5. Очевидно, перенапряжения в этом случае будут минимальными – не более (2,4-2,6)  $U_{фн}$  и, кроме того, на время оперативных переключений с вводом резервного питания сохраняется возможность оставить поврежденную линию в работе.

Известно, что используемые сегодня во всем мире плунжерные дугогасящие реакторы не предназначены для компенсации тока непромышленной частоты без введения дополнительных фильтров, инверторов и устройств их регулирования. Однако в некоторых случаях целесообразно компенсировать и активный остаточный ток однофазного замыкания на землю, обусловленный наличием в сети активных проводимостей на землю, а также джоулевых потерь в самих ДГР. Для этого можно использовать схему, обеспечивающую при возникновении ОЗЗ инжекцию в цепь нейтрали дополнительного активного тока, сдвинутого на 180° относительно ожидаемого активного тока в точке повреждения.

Полная компенсация остаточного тока способствует снижению восстанавливающего напряжения на поврежденной фазе и уменьшает вероятность развития аварийной ситуации. При рассматриваемом способе заземления нейтрали возникновение импульсных дуговых перенапряжений с уровнем, превышающим текущую электрическую прочность изоляции оборудования – редкое явление. Это означает, что доля самоликвидирующихся после первого пробоя «клевков» на землю может возрасти до 90-95% (речь идет о кабельных и смешанных сетях с БПИ-кабелями). Для кабельных линий на основе кабелей с СПЭ или ЭПР-изоляцией минимизация остаточного тока замыкания на землю приводит к уменьшению степени повреждения изоляции, подобно тому, как это происходит при шунтировании ОЗЗ однополюсным заземляющим выключателем.

Активное внедрение систем с компенсацией реактивной и активной состав-

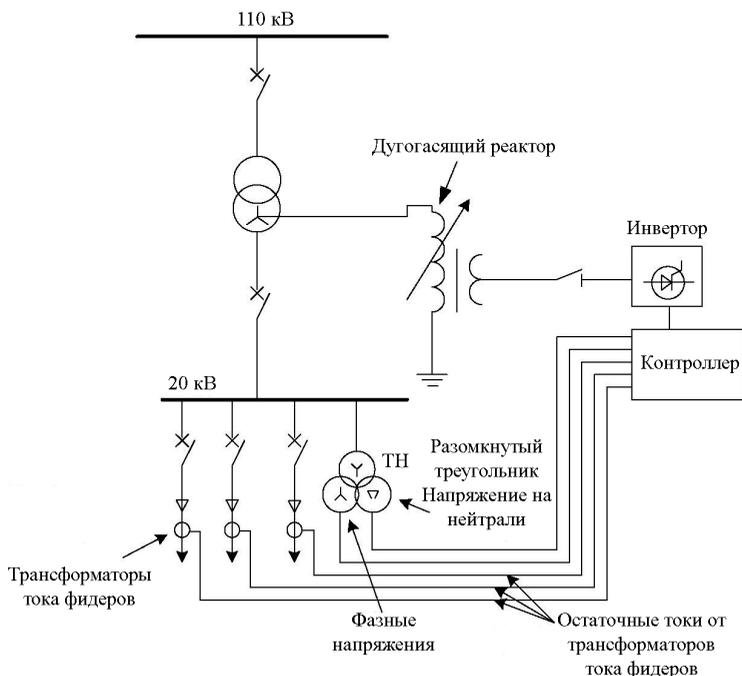


Рис. 5. Схема заземления нейтрали с компенсацией остаточного активного тока ОЗЗ



**Телгин Андрей Владимирович**

Дата рождения: 26.03.1987 г., окончил в 2010 г. Новосибирский государственный технический университет, кафедра систем электроснабжения предприятий, магистр техники и технологии по направлению Электроэнергетика, старший инженер научно-исследовательского отдела ООО «Болид»



**Ширковец Андрей Игоревич**

дата рождения: 06.09.1983 г., окончил в 2006 г. Новосибирский государственный технический университет, кафедра техники и электрофизики высоких напряжений, магистр техники и технологии по направлению Электроэнергетика. В настоящее время соискатель ученой степени кандидата технических наук (НГТУ), научный руководитель д.т.н., профессор К.П. Кадомская, ведущий инженер научно-исследовательского отдела ООО «Болид»

ляющих тока ОЗЗ в настоящее время происходит в Швеции. Они носят название GFN (Ground Fault Neutralizer) – система нейтрализации тока замыкания на землю [11]. Кроме Швеции, возможности применения такой системы изучаются в Латвии [12] и Венгрии [13]. В состав системы GFN входят дугогасящий реактор ASC (Swedish Neutral), инвертор-компенсатор остаточного тока и шкаф управления. Особенностью применяемых ДГР является отсутствие в их составе плунжера, регулирование индуктивного тока происходит за счет коммутации конденсаторных батарей во вторичной низковольтной обмотке. Анонсируются высокое быстродействие системы (выход на режим полной компенсации емкостного тока 60 мс), возможность эксплуатации в кабельных сетях с низкой асимметрией (вводится дополнительный источник  $3U_0$ ), а также возможность определения места повреждения на линии, в том числе при переходном сопротивлении в точке ОЗЗ более 20 кОм. Измерение активной проводимости утечек по изоляции сети позволяет настраивать систему GFN для выдачи соответствующего активного тока в противофазе. Следует отметить, однако, что о возможности компенсации высших гармоник в токе ОЗЗ упоминается как об опции, параметры которой настраиваются индивидуально, для конкретной сети. Вместе с тем хорошо известно, что уровень высших гармоник в токе замыкания на землю может быть весьма заметным (ток искажения достигает десятков процентов от составляющей 50 Гц), он зависит от многих факторов, а их содержание может существенно изменяться даже в течение одного дня, не говоря уже о более длительном периоде регистрации [14]. Это зачастую является объективной причиной некорректной работы релейных защит от ОЗЗ на высших гармониках, не дублирующих метод определения поврежденного фидера с помощью других принципов. Поэтому говорить о полной и качественной компенсации тока ОЗЗ с помощью системы GFN, включая подавление высших гармоник специальными фильтрами, которые должны быть интегрированы в контур нулевой последовательности, пока преждевременно.

Тем не менее, сети с резонансным заземлением нейтрали и компенсацией остаточного тока имеют важное преимущество. Этот режим заземления нейтрали позволяет присоединять текущую сеть к прилегающим подстанциям с изолированной или компенсированной нейтралью без каких-либо проблем. Система компенсации остаточного тока автоматически отслеживает конфигурацию сети и изменение ее эквивалентной активной проводимости для повышения вероятности успешного гашения дуги при замыканиях на землю. Справедливости

ради следует подчеркнуть, что в России основы метода полного подавления тока ОЗЗ были разработаны в свое время профессором В.К. Обабковым, предложившим компенсировать помимо реактивной также и активную составляющую остаточного тока ОЗЗ [15, 16]. Внедрение указанного способа усложняется задачей автоматической идентификации состава тока замыкания и регулирования комбинированного устройства подавления дуговых замыканий. При этом не решенной остается проблема наличия в токе ОЗЗ высших гармоник, которые по эквивалентному среднеквадратическому значению могут превышать действующее значение его активной составляющей. Последняя определяется суммарной активной проводимостью изоляции на землю, которая не превышает обычно 3-5% от емкостной проводимости сети.

### Выводы

1. Несмотря на относительное многообразие способов заземления нейтрали, в сетях среднего напряжения за рубежом используются в основном режимы с компенсацией емкостного тока (начиная от значений 10-15 А), резистивное заземление и их комбинации. В португальской распределительной сети 63 кВ используется глухое заземление нейтрали. В США, Финляндии и Латвии (сети 13,8-20 кВ) ток ОЗЗ, напротив, ограничивается, по сравнению с током однофазного КЗ, активным или реактивным сопротивлением в нейтрали до значений 400-1000 А.

2. Одним из наиболее активно применяемых во всем мире является способ резистивного заземления нейтрали с организацией действия релейных защит от ОЗЗ, в зависимости от условий по надежности электроснабжения и электробезопасности персонала, а также наличия и быстродействия АВР, на сигнал или на отключение. Указанный способ заземления нейтрали реализуется в сетях напряжением до 69 кВ в Австрии, Германии, Чехии, Финляндии, Японии, Австралии, США и многих других странах.

3. В Швейцарии в 2008-2010 гг. успешно апробирован метод шунтирования ОЗЗ однополюсными заземляющими выключателями, позволяющий минимизировать повреждения оборудования при замыканиях на землю. Примерно в это же время указанный способ был анонсирован в работах китайских ученых. Однако по факту шунтирование однофазного замыкания заземляющим выключателем было предложено в СССР еще в 1975 г.

4. Сегодня одним из наиболее перспективных способов ликвидации однофазных замыканий на землю, который получил опыт применения



в Швеции и Германии (в сетях с компенсацией емкостного тока), представляется полное подавление остаточного тока в месте замыкания. Практическая реализация систем компенсации реактивной и активной составляющих тока ОЗЗ предлагается шведской компанией «Swedish Neutral» на основе бесплунжерного реактора оригинальной конструкции, а также специального инвертора. В России теоретические основы данного метода и предложения по его инструментальному обеспечению были разработаны профессором В.К. Обабковым в 1980-х гг.

**Литература**

1. IEEE 100 The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms. Seventh Edition.
2. Sults V., Kalcevs G., "Concepts and Practical Neutral Earthing Modes in Latvia's 20 kV Rural Networks" // Proceedings of PQ2008 6th International Conference: 2008 Electric Power Quality and Supply Reliability (August 27-29, 2008 Pärnu, Estonia). P. 187– 192.
3. IEEE Std 142-2007 (Green Book). IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.
4. Fuchs E., Fickert L., «The Self-Extinguishing Current Limit and the Arc Burning Time of Compensated 20-kV-Power-Grids» // Proceedings of PQ2012 8th International Conference: 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability (June 11-13, 2012 Tartu, Estonia). P. 229-235.
5. Protective Relaying. Principles and Applications. Third Edition. By J. Lewis Blackburn, Thomas J. Domin (CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006).
6. Емельянов Н.И., Ильиных М.В., Кудряшов Д.С. О способах подключения высокоомных защитных резисторов для заземления нейтрали сети и их безопасной эксплуатации. // Научные про-

блемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – спец. вып. №1. – с. 62-65.

7. Koepl G., Abaecheri P, Schmid A., Voss G., «Concept and practical testing of single pole operated earthing breakers in an urban MV cable network» // Proceedings of 18th International Conference on Electricity Distribution: CIRED 2005 (June 06-09, 2005 Turin, Italy).
8. Георгиевский В.Л. Оптимизация режима нейтрали электрической сети: автореф. дис. ... канд. тех. Наук: 05.14.06 / В.Л. Георгиевский; Новосибирский гос. тех. ун-т. – Новосибирск, 1975. – 27 с.
9. Чэнь Вэй-сянь, Чэнь Хо. Новый способ гашения дуги однофазного короткого замыкания в сетях с изолированной нейтралью. // Электричество. – 2009. – №1. – с. 54-57.
10. Tasman L. Scott, Klaus Winter, «The first application of resonant earthing with residual compensation to a New Zealand distribution network» // Proceedings of EESA Energy NSW Conference (September 2007).
11. <http://zaonipo.ru/zao-nipo/sistema-neitralizacii-toka-odnofaznogo-zamikaniya-na-zemlyu-ground-fault-neutralizer.html>
12. Rozenkrons J., Sults V., Priedite I., «Quenching of Partial Discharges in Medium Voltage Networks by Traditional Arc Suppression Coil» // Proceedings of PQ2010 7th International Conference: 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability (June 16-18, 2010 Kuressaare, Estonia). P. 203 – 206.
13. Raisz D., Dán A., «Comparison of Different Methods for Earth Fault Location in Compensated Networks» // Proceedings of PQ2010 7th International Conference: 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability (June 16-18, 2010 Kuressaare, Estonia). P. 237-242.
14. Ширковец А.И. Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги. // Релейная защита и автоматизация. 2011. №04. – С. 54-59.
15. А.с. 813587 (СССР). Устройство для компенсации полного тока однофазного замыкания на землю / В.К. Обабков, Ю.Н. Целуевский. – Оубл. в БИ, 1981, № 10.
16. Обабков, В.К. Устройство автокомпенсации емкостных и активных составляющих типа УАРК в системах электроснабжения с резонансным заземлением нейтрали / В.К. Обабков, Ю.Н. Целуевский // Промышленная энергетика, №3, 1989. – С.17-21.

**ГЕНЕРАТОР ТЕХНИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ГТЧ-03М**



ООО «Радиоэлектронные системы» производит генератор технической частоты ГТЧ-03М, предназначенный для испытания, наладки и технического обслуживания устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики. Генератор обеспечивает автоматизированное измерение частоты и времени срабатывания устройств защиты при плавном и скачкообразном изменении частоты. ГТЧ-03М внесен в реестр средств измерений и имеет сертификат соответствия РосТест.

- Компактный, легкий – 3кг.
- Брызгозащитный ударопрочный корпус-чемодан.
- Комплектуется длинными высококачественными силиконовыми проводами с изолированными клеммами и зажимами типа «крокодил».
- Диапазон рабочих температур от -20 С° до +50 С°.
- Межповоротный интервал – 3 года.
- Гарантия – 3 года.

**620137, г. Екатеринбург, ул. Июльская, 41**  
**Тел.: 8(343)374-24-64 доб. 140**  
**<http://www.irsural.ru>**  
**e-mail: [z@irsural.ru](mailto:z@irsural.ru)**