

В последнее время в сетях 6–35 кВ России получило некоторое распространение так называемое комбинированное заземление нейтрали. В этом варианте заземления нейтрали параллельно дугогасящему реактору предлагается установить постоянно включенный высоковольтный высокоомный резистор. Применение такого варианта заземления нейтрали достаточно спорно и петербургские авторы в своем материале рассматривают причины, по которым данное техническое решение вызывает неоднозначные оценки.

КОМБИНИРОВАННОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ В СЕТЯХ 6–35 кВ Мифы и реальность

В последние 10–15 лет сетевым компаниям, промышленным предприятиям и проектным организациям активно предлагается к использованию вариант так называемого комбинированного заземления нейтрали [1–4].

В этом варианте параллельно дугогасящему реактору (ДГР) предлагается установить постоянно включенный высоковольтный высокоомный резистор (рис. 1, 2).

Напомним, что высокоомным резистором является резистор, который создает суммарный (активный плюс емкостный) ток в месте повреждения не более 10 А [5]. Только при такой величине полного тока в месте повреждения допустима длительная работа сети с однофазным замыканием на землю без отключения.

Как правило, авторы работ [1–4] в схеме рис. 1, 2 рекомендуют высокоомный резистор с активным током не более 11,5 А (в большинстве случаев 2–10 А), рассчитанный на работу в течение 6 часов в режиме однофазного замыкания.

В качестве обоснования такого технического решения приводятся три довода:

1. снижение перенапряжений при дуговых замыканиях, которое обеспечивает резистор, постоянно включенный параллельно ДГР;
2. возможность организации селективной релейной защиты от замыканий на землю;
3. снижение естественного напряжения несимметрии на нейтрали (смещения нейтрали).

Чтобы не быть голословными процитируем публикацию [3]: «Правильный выбор резистора и точная настройка ДГР на резонансный режим компенсации емкостных токов замыкания на землю позволяет ограничиваться безопасными для электрооборудования перенапряжениями в сети на уровне (1,8–2,0) U_{ϕ} , т.е. практически линейным напряжением сети и создают условия для надежного дугогашения, исключая перемежающиеся дуговые замыкания и множественные повреждения линий. Бесспорное достоинство такого режима нейтрали заключается также в возможности реализации селективных защит от ОЗЗ, выполненных даже на простых токовых реле. Это связано с появлением в токе замыкания дополнительной активной составляющей, величина которой определяется номиналом резистора в нейтрали».

Рассмотрим эти три преимущества подробно.

СНИЖЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Для проверки первого довода нужно вспомнить теорию дуговых перенапряжений в сети с изолированной (заземленной через ДГР) нейтралью.

На рис. 2 показана типовая схема подстанции (ПС) с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (пунктиром показан предлагаемый авторами [1–4] резистор, постоянно подключенный параллельно реактору).

На рис. 3 приведена схема замещения сети (рис. 2) для анализа дуговых перенапряжений в сети, питающейся от этой ПС.

Для упрощения не показаны элементы, слабо влияющие на обсуждаемый вопрос (активные сопротивления трансформато-

ров и ДГР, продольные активно-индуктивные сопротивления кабелей). Междупазные емкости оказывают определенное влияние на процесс дуговых замыканий, но мы ими также пренебрежем.

На рис. 4 приведена стилизованная осциллограмма переходного процесса при возникновении однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью.

На рис. 4 до момента времени t_1 имеет место нормальный режим работы сети. Напряжения на емкостях относительно земли $u_a^{(1)}$, $u_b^{(1)}$, $u_c^{(1)}$ равны фазным и примерно равны соответствующим фазным ЭДС (при неучете падения напряжения на сопротивлении силового трансформатора от протекания тока нагрузки).

В момент времени t_1 , когда напряжение на фазе А проходит через максимум (на рис. 4а это -1 относительная единица, о.е.) возникает пробой изоляции на землю, и напряжение на фазе А падает до нуля.

В этот же момент времени t_1 напряжения на неповрежденных фазах В и С относительно земли имеют мгновенное значение + 0,5 о.е. От этого мгновенного значения напряжения неповрежденных фаз относительно земли начинают переход к новому вынужденному значению, равному линейной величине – 1,73 о.е.

То есть происходит перезаряд емкостей неповрежденных фаз на землю от мгновенного фазного напряжения в момент замыкания к новому мгновенному линейному напряжению. Этот перезаряд происходит в колебательном высокочастотном процессе (на рис. 4б – участок кривой напряжения $u_b^{(2)}$ в промежутке времени t_1-t_2).

В колебательном процессе перезаряда напряжение на емкости неповрежденной фазы может достигать в пределе величины 2,5–2,7 о.е. (на рис. 4б в момент времени t_2 напряжение $u_{b\max} = 2,3$ о.е.). Это и есть так называемые дуговые перенапряжения.

Процесс перезаряда емкостей высокочастотным током (полуволна этого тока показана на рис. 4в в промежутке времени t_1-t_2) идет по пути наименьшего сопротивления – через индуктивность силового трансформатора, поврежденную фазу и землю. Путь высокочастотного тока перезаряда емкостей показан на рис. 3 синим пунктиром.

Поскольку процесс перезаряда емкостей идет на высокой частоте, индуктивное сопротивление маломощного трансформатора заземления нейтрали $X_{ТЗН}$ (см. рис. 3) имеет на этой частоте очень большое значение. Вследствие этого ни ДГР, ни какой-либо резистор не могут участвовать в этом переходном процессе, так как высокочастотные токи через них не замыкаются! Соответственно, ни ДГР, ни параллельно включенный ему высокоомный резистор не могут ограничить дуговые перенапряжения, вызываемые первым зажиганием дуги.

Таким образом, оборудование, включенное в нейтраль маломощного трансформатора заземления нейтрали (реактор или резистор), начинает работать только после гашения перемежающейся дуги однофазного замыкания, разряжая через себя избыточный заряд емкостей на землю и ликвидируя тем самым возможность повторного зажигания дуги при наличии повышенного напряжения на нейтрали.

Александр Назарычев,
д.т.н., профессор, ректор ФГАОУ
ДПО «ПЭИПК» Минэнерго России

Андрей Пугачев,
к.т.н., зам. генерального
директора ООО «ЕГЕ-Энерган»

Сергей Титенков,
к.т.н., генеральный директор
ООО «ЕГЕ-Энерган»

г. Санкт-Петербург

Комбинированное заземление нейтрали, предлагаемое в [1–4]

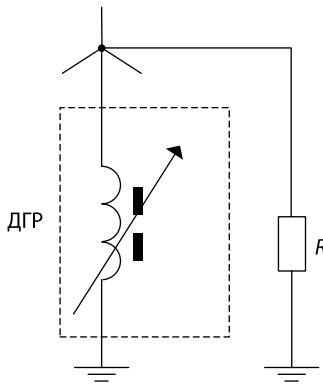


Рис. 1 •

Типовая схема подстанции с заземлением нейтрали через ДГР (пунктиром показан резистор, предлагаемый авторами [1–4])

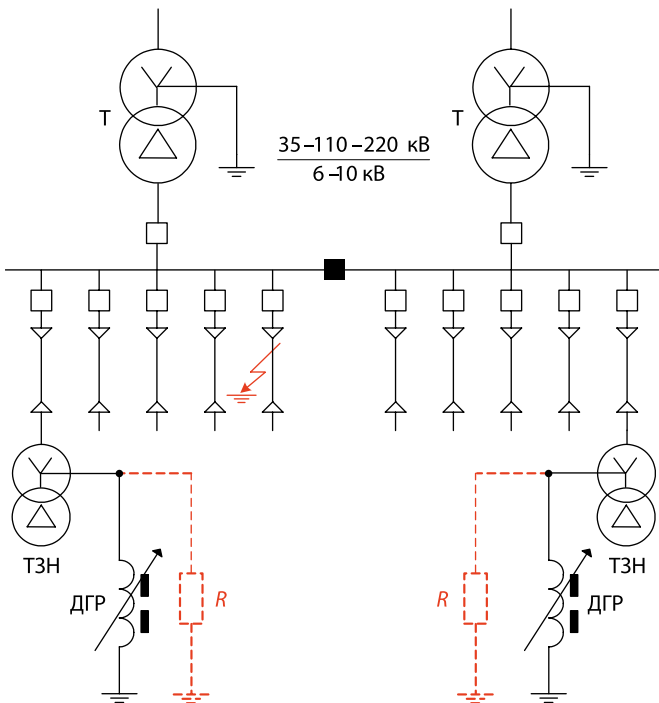


Рис. 2 •

Схема замещения сети 6–10 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР (или комбинированным заземлением) для анализа процессов при дуговом замыкании на землю

X_T – индуктивное сопротивление силового трансформатора Т;
 $X_{ТЗН}$ – индуктивное сопротивление трансформатора заземления нейтрали ТЗН;
 C_Σ – суммарная емкость одной фазы сети на землю;
 X_P – индуктивное сопротивление ДГР.

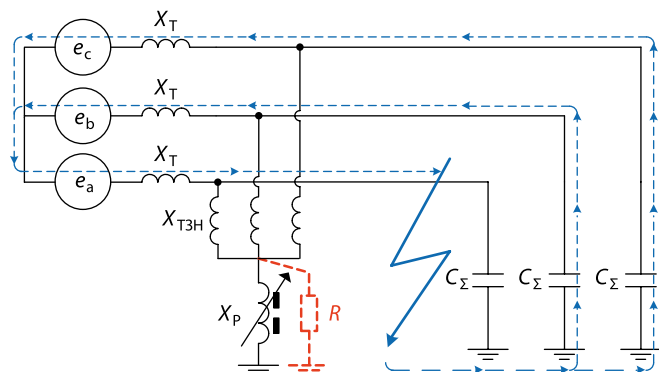


Рис. 3 •

Стилизованная осциллограмма переходного процесса при возникновении однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью

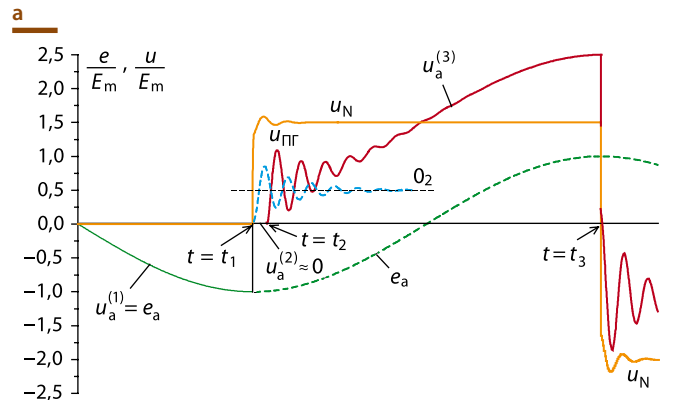
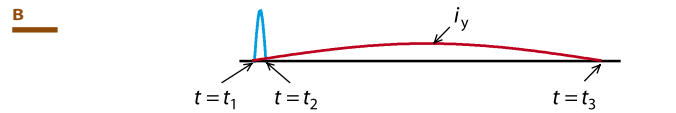
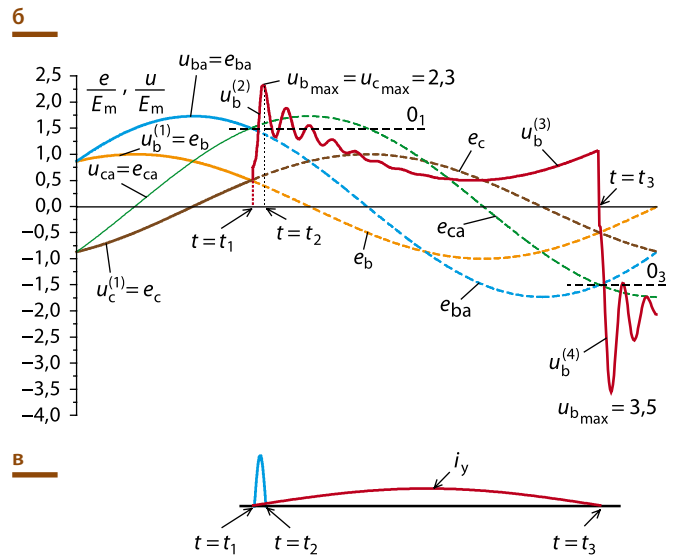


Рис. 4 •



Из приведенного выше анализа следует, что постоянно включенный параллельно настроенному в резонанс (или с небольшой расстройкой $\pm 5\%$) реактору высокоомный резистор (комбинированное заземление нейтрали) никак не влияет на максимально возможный уровень перенапряжений в сети при дуговых однофазных замыканиях на землю.

При настройке дугогасящего реактора в резонанс максимальные перенапряжения возможны при каждом зажигании дуги и не превышают 2,5–2,7 о.е. Наличие или отсутствие высокоомного резистора параллельно реактору никак не влияет на этот уровень перенапряжений.

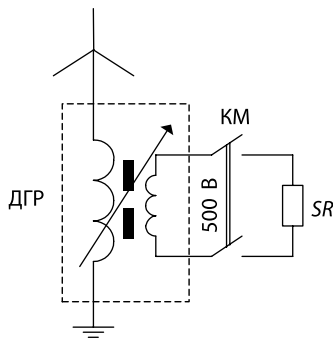
Соответственно приведенное выше утверждение авторов статьи [3] о способности комбинированного заземления нейтрали ограничить дуговые перенапряжения в сетях 6–35 кВ до уровня 1,8–2,0 о.е. не соответствует действительности.

Вывод об отсутствии влияния на максимальный уровень дуговых перенапряжений высокоомного резистора, включенного параллельно ДГР, подтверждается и в публикации [6], автор которой получил от специалистов ТЭЦ Новокузнецкого металлургического комбината (НКМК) реальные осциллограммы замыканий на землю в сети 6 кВ с комбинированным заземлением нейтрали. Уровень перенапряжений там составил 2,7 о.е., т.е. такой же, как и для заземления нейтрали только через ДГР. Как справедливо отметил автор работы [6], создатели системы комбинированного заземления нейтрали на НКМК для обоснования своего технического решения и написания статьи использовали только нужные им осциллограммы.

В обосновании применения комбинированного заземления нейтрали часто упоминается, что:

– Резистор, включенный параллельно ДГР, обеспечивает быстрое снижение напряжения на нейтрали (разряд емкости сети на землю) после погасания дуги, и тем самым снижает время

• **Рис. 5.** Схема подключения ДГР 10 кВ с низковольтным шунтирующим резистором SR 500 В.



воздействия линейных напряжений на фазную изоляцию неповрежденных фаз;

- Резистор, включенный параллельно ДГР, ограничивает дуговые перенапряжения с биениями напряжений, возникающие после отключения части емкости сети из-за перехода однофазного замыкания на землю в двойное замыкание с отключением одного поврежденного фидера и остающимся дуговым замыканием на другом фидере.

С утверждением о быстром снижении напряжения на нейтрали после погасания дуги за счет действия резистора можно было бы согласиться, если бы не одно «но». Это возможно только в случае, когда резистор имеет достаточно низкое сопротивление и создает активный ток, близкий к емкостному.

Возвращаясь к сети 6 кВ ТЭЦ НКМК, где емкостный ток, согласно [2], равен 136 А, а резисторы 6 кВ 300 Ом включены параллельно реакторам ЗРОМ, работающим на отпайках 53,6 и 87 А, оценим возможность быстрого разряда емкости через эти резисторы.

Для этого определим индуктивные сопротивления реакторов на указанных отпайках по формуле $X_p = U_{\phi} / I_{\text{отпайки}}$. Для отпайки 53,6 А индуктивное сопротивление реактора составит $X_{p1} = 3460 / 53,6 = 65$ Ом, аналогично для отпайки 87 А – $X_{p2} = 40$ Ом. Очевидно, что индуктивные пути разряда емкости сети через дугогасящие реакторы с сопротивлениями 65 и 40 Ом имеют сопротивление в 4,6–7,5 раз ниже активных путей разряда через резисторы с сопротивлением 300 Ом. Ток течет по пути наименьшего сопротивления, поэтому влияние резисторов на разряд емкости на землю после гашения дуги в сети 6 кВ ТЭЦ НКМК будет крайне незначительным, что подтверждается и автором работы [6], анализирувавшим реальные осциллограммы однофазных замыканий.

В большинстве случаев авторы [1–4] рекомендуют комбинированное заземление нейтрали с установкой параллельно реакторам резисторов, создающих ток величиной 2–10 А. Однако, к примеру, у дугогасящего реактора ZTC50 напряжением 6 кВ и минимальной мощностью в номинальном ряду, равной 190 кВА, предельный ток компенсации составляет 55 А. Это означает, что даже в параллель с таким реактором резистор на 10 А слабо повлияет на разряд емкости сети после гашения дуги. При больших мощностях ДГР утверждение о разряде емкости сети через резистор с током 2–10 А после гашения дуги замыкания на землю вообще теряет смысл.

Довод о необходимости резистора параллельно реактору для ограничения перенапряжений при однофазном замыкании на землю и внезапном отключении части емкости сети (по причине двойного замыкания) также вызывает большие сомнения.

Вариант отключения части емкости сети в связи с ручным поиском однофазного замыкания методом поочередной коммутации фидеров здесь и далее не рассматриваем. Этот архаичный метод должен быть запрещен в эксплуатации, как опасный развитием аварии и негативно влияющий на потребителей.

Величина отключаемой при двойном замыкании емкости определяется длиной фидера. Если все фидера на секции примерно одной длины и их достаточно много (20 и более), то отключение одного фидера не вызовет существенного нарушения настройки компенсации. Расстройка будет в пределах 5%, причем в сторону перекомпенсации, и уровень перенапряжений не превысит таковой при резонансной настройке.

Если же в сети имеется один фидер с большой емкостью на землю (например, питание РП), который отличается от остальных, то не факт, что при двойном замыкании отключится именно он, а не тот фидер, на котором возникло первое замыкание на землю (трансформаторы тока есть в фазах А и С). Кроме того нужно, чтобы на фидере с большой емкостью пробой был на участке от подстанции до РП, а не на фидерах, отходящих от РП, иначе отключится фидер с малой емкостью, отходящий от РП. Кроме того, уставка защит от междуфазных КЗ по времени на фидере, питающем РП, всегда выше, чем на тупиковых фидерах. Не слишком ли много условий должно быть выполнено, чтобы отключилась значительная емкость и идея комбинированного заземления нейтрали начала работать?

Ну и самое главное: при возникновении двойного замыкания ток, протекающий через место повреждения, достигает, как правило, нескольких килоампер. Такой ток вызывает прожигание места повреждения и оставшееся в сети однофазное замыкание практически всегда будет устойчивым (металлическим без перемежающейся дуги). Это означает, что перенапряжений в сети не будет и резистор параллельно реактору не нужен.

Таким образом, вероятность отключения части емкости сети с последующими дугowymi перенапряжениями крайне низка и использовать это событие для обоснования применения постоянно включенного параллельно дугогасящему реактору высокоомного резистора не правильно.

ОРГАНИЗАЦИЯ СЕЛЕКТИВНОЙ РЗА

Рассмотрим теперь второй довод, приводимый в пользу комбинированного заземления нейтрали: возможность организации селективной релейной защиты от замыканий на землю.

Сразу следует сказать, что организовать простую токовую (ANSI 51N) защиту по $3I_0$ от замыканий на землю на токах 2–10 А, которые создает параллельный реактору резистор, крайне сложно, поскольку слишком мал ток.

В кабельных сетях 6–35 кВ токовые защиты от замыканий отстраиваются от собственного емкостного тока присоединений по известной формуле, приведенной например в [7]:

$$I_{\text{ср}} = k_n \cdot k_g \cdot I_c$$

где $k_n = 1,3$ – коэффициент надежности; k_g – коэффициент броска, принимаемый в диапазоне от 1 до 5 в зависимости от типа релейной защиты и наличия (отсутствия) выдержки времени; I_c – собственный емкостный ток присоединения (включая собственный емкостный ток секции РП, если фидер питает сборку).

Для реле типов РТ-40, РТЗ-50, РТЗ-51, например, коэффициент броска равен $k_g = 3$ –5 и при собственном емкостном токе кабеля 2 А (что отвечает длине всего 2 км) ток срабатывания защиты от замыканий на землю должен быть равен $1,3 \times 5 \times 2 = 13$ А. А высокоомный резистор, чаще всего рекомендуемый в [1–4], создает ток не более 10 А. Поэтому утверждать, как это делают авторы [3], что: «...беспорное достоинство такого режима нейтрали (комбинированного) заключается также в возможности реализации селективных защит от ОЗЗ, выполненных даже на простых токовых реле» не правильно.

При токах 5–10 А, создаваемых резистором параллельно реактору, будут работоспособны только направленные защиты. Направленные защиты по активной составляющей тока $3I_0$ (или активной мощности нулевой последовательности) пока мало распространены в эксплуатации. Даже при строительстве новых подстанций к ним зачастую присоединяют потребительские РП, на которых нет направленных защит от замыканий на землю.

Проблема с релейной защитой от замыканий на землю в сетях с ДГР в европейских странах решается проще. ДГР оснащаются вспомогательной силовой обмоткой 500 В, к которой кратковременно (1–3 с) по факту возникновения напряжения $3U_0$ контактором КМ подключается малогабаритный шунтирующий низковольтный резистор (рис. 5), создающий кратковременный активный ток $3I_0 = 10$ –100 А (по первичной стороне) только в поврежденном фидере [5]. Вот этого тока действительно достаточно для работы простых токовых защит от замыканий на землю.

СНИЖЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ НА НЕЙТРАЛИ

Рассмотрим последний довод в пользу комбинированного заземления нейтрали: снижение естественного напряжения несимметрии на нейтрали (смещения нейтрали). Эта проблема,

как правило, не проявляется в чисто кабельных сетях 6–10 кВ и действительно существует в смешанных кабельно-воздушных сетях 6–10 кВ и особенно в сетях 35 кВ.

Неравенство емкостей фаз на землю вызывает появления напряжения на нейтрали в нормальном режиме на уровне до нескольких процентов. При включении в нейтраль такой сети ДГР и настройке его в резонанс, естественное напряжение несимметрии усиливается и возникает существенное смещение нейтрали, иногда значительно превышающее нормируемое значение 15%. В подобных случаях подключение высокоомного высоковольтного резистора параллельно ДГР (рис. 1) действительно может помочь привести смещение нейтрали к норме (существенно снизить его).

Но более простая и дешевая альтернатива данному решению – использование ДГР с нормально подключенным резистором на вспомогательной силовой обмотке 500 В (рис. 5), который отключается с выдержкой времени после возникновения замыкания на землю. В этом варианте низковольтный резистор на обмотке 500 В ДГР в нормальном режиме работы сети (без замыкания на землю) постоянно подключен (контактор КМ нормально замкнут) и эффективно демпфирует смещение нейтрали. Резистор SR имеет кратковременную термическую стойкость 60 сек к протеканию тока, вызываемого фазным напряжением на нейтрали в процессе однофазного замыкания на землю. Поэтому при возникновении замыкания на землю через выдержку времени он должен быть отключен.

В заключение отметим, что в европейских странах такое техническое решение, как комбинированное заземление нейтрали (постоянное включение высокоомного высоковольтного резистора параллельно плавнорегулируемому дугогасящему реактору) не применяется в принципе.

ВЫВОДЫ

- При настройке дугогасящих реакторов в резонанс комбинированное заземление нейтрали (включение резистора параллельно реактору) не оказывает никакого влияния на максимальный уровень дуговых перенапряжений в сети.
- С точки зрения организации селективной релейной защиты от замыканий на землю комбинированное заземление нейтрали при токах резистора до 10 А хуже, чем использование плавнорегулируемых дугогасящих реакторов с кратковременно подключаемыми на вспомогательную обмотку шунтирующими резисторами 500 В.
- Комбинированное заземление нейтрали обеспечивает снижение естественного напряжения несимметрии на нейтрали сети, но использование для той же цели дугогасящих реакторов с шунтирующими резисторами на вспомогательной обмотке 500 В – более экономичное и малогабаритное решение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильиных М.В., Ширковец А.И., Сарин Л.И., Буянов Э.В. Компенсированная и комбинированно заземленная нейтраль. Опыт эксплуатации сети 6 кВ металлургического комбината // Новости ЭлектроТехники. 2007. № 2(44).
2. Сарин Л.И., Ильиных М.В., Ширковец А.И., Буянов Э.В., Шамко В.Н. Анализ результатов мониторинга процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали // Энергоэксперт. 2008. № 1.
3. Емельянов Н.И. Ширковец А.И. Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ // Энергоэксперт. 2010. № 2.
4. Телегин А.В., Ширковец А.И. Проблематика замыканий на землю и режим заземления нейтрали в сетях среднего напряжения стран Европы и Америки // Релейная защита и автоматизация. 2012. № 3.
5. Назарычев А.Н., Пугачев А.А., Титенков С.С. Комплексные инновационные решения по заземлению нейтрали в сетях 6–35 кВ // Электроэнергия: передача и распределение. 2016. № 3(36).
6. Миронов И.А. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока или стандарт по режимам заземления нейтрали? // Энергоэксперт. 2016. № 1.
7. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. СПб: ПЭИПК, 2003.