

# ОПЫТ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТНОГО ТОКА В СЕТЯХ 6–10 кВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ МЕТОДОМ ИНЖЕКЦИИ ТЕСТОВОГО СИГНАЛА

**ШИРКОВЕЦ А.И.**, к.т.н., доцент кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» ФГБОУ ВО «НГТУ», заместитель директора по науке ООО «Болид»

**ЧАЩИН О.А.**, главный эксперт Направления энергетика ПАО «СИБУР Холдинг»

**ЛИСКЕ А.Г.**, ведущий инженер ООО «Болид»

В статье рассмотрены результаты опытной апробации в сетях электроснабжения промышленного предприятия мобильного устройства для измерения параметров сети, в первую очередь емкостного тока замыкания на землю. Устройство функционирует на основе алгоритмов инъекции тестового сигнала в контур нулевой последовательности и обработки отклика. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с расчетами ёмкостного тока на основе параметров и протяженности кабельных линий 6–10 кВ комбината в текущей схеме сети на момент измерений. Показано, что стохастичность ошибки определения ожидаемого тока замыкания нивелирует преимущества прибора.

**Ключевые слова:** электрическая сеть, емкостный ток, замыкание на землю, измерение параметров сети, инъекция сигнала, непрогнозируемая ошибка

Задачи обоснованного выбора оборудования для заземления нейтрали при проектировании, оценка развития сети с позиции необходимости новых или достаточности существующих мощностей систем компенсации емкостного тока, а также проверка работоспособности установленных дугогасящих реакторов (ДГР) и агрегатов (ДГА), силовых резисторов и автоматики в эксплуатации определяют необходимость регулярного, не реже 1 раза в 6 лет, измерения ёмкостного тока в электрических сетях 6–35 кВ. Периодичность и объем таких измерений регламентируются действующими Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [1, п. 571, п. 621]. Заменять измерения расчетом емкостного тока правилами допускается только для сетей простой структуры, к которым нельзя отнести современные сети электроснабжения промышленных комбинатов и мегаполисов. Следовательно, закономерным будет организовать и провести натурные измерения

параметров сети, из которых для эксплуатирующей организации, в том числе ответа на предписание Ростехнадзора, ключевым является ток однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Правильный выбор методики измерений и математической обработки результатов определяет корректность их интерпретации, заключений и рекомендаций по дальнейшему расчету, проверке и выбору устройств для заземления нейтрали.

## ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЕ ЕМКОСТНОГО ТОКА

Известны различные методы измерения ёмкостного тока ОЗЗ [2], к основным из которых можно отнести прямое искусственное замыкание на землю, ассиметрирование сети с помощью дополнительной емкости (реже – активного сопротивления), построение графика зависимости напряжения на нейтрали от индуктивного тока ДГР. Каждый метод имеет свои особенности, определяющие оптимальную область его применения, информативность и безопасность. Наи-

лучшие результаты дает одновременная запись на цифровые осциллографы сигналов напряжения после преобразования их первичных мгновенных значений с помощью современных широкополосных делителей напряжения, а также тока замыкания и тока реактора – с зашунтированных активным сопротивлением обмоток опорных трансформаторов тока [3]. Для этого должны быть использованы поверенные (калиброванные по частоте) первичные датчики. В указанной постановке исследуемые сигналы гарантированно будут записаны с необходимой точностью и по амплитуде, и по частоте, соответствуя реальным переходным процессам в электрической сети. Для иллюстрации этих положений на рис. 1 приведена натурная осциллограмма кратковременного искусственного замыкания на землю на участке сети электроснабжения металлургического завода, где выполнена компенсация емкостного тока с помощью плунжерного ДГА конденсаторного типа мощностью 400 кВА с пределами регулирования тока 6,6–66 А

и вторичным резистором 1,73 Ом в обмотке 500 В.

Выполненный после компьютерной обработки цифровых осциллограмм анализ показал, что гармонический ток искажения (суммарное содержание гармоник, со 2-й по 40-ю) достиг здесь 7,5 А при величине промышленной составляющей нескомпенсированного тока ОЗЗ 1,72 А. Обращает на себя внимание, что ток ДГР частоты 50 Гц при этом составил 46,3 А, а расстройка компенсации – 4,2 %. Таким образом, при формальном исполнении нормативного требования 5 % перекомпенсации [1, п. 623] ток высших гармоник при ОЗЗ превысил его 50 Гц составляющую в 4,4 раза. Это ставит перед эксплуатирующей организацией вопрос о целесообразности компенсации емкостного тока в данном случае и подтверждает необходимость осциллографирования для выявления подобных ситуаций.

#### МЕТОД ИНJEKЦИИ СИГНАЛА НЕПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Для контроля настройки ДГР в режим, близкий к резонансу и регулирования индуктивного тока ДГР разработан и запатентован способ определения емкости сети с помощью возбуждения свободных колебаний и регистрации обратного сигнала в контуре нулевой последовательности [4, 5]. Этот метод применяется в устройствах автоматики управления ДГР и реализуется на алгоритмах инъекции тестового сигнала не промышленной частоты в нейтраль сети через вторичную обмотку управления реактора с обработкой отклика встроенным программным обеспечением. Результатом служит ожидаемый емкостный ток сети с соответствующей проверкой и, при необходимости подстройкой реактора управляющими командами на перемещение плунжера или коммутацию вторичных конденсаторов (в зависимости от конструкции и принципа работы силовой части системы компенсации).

В рамках настоящего исследования в действующей сети 6–10 кВ электропитания технологических процессов и производств нефтехимического комбината выполнена апробация способа определения емкостного тока на принципе инъекции тестового сигнала с помощью прибора измерения параметров сети (ИПС), реализованного в форм-факторе

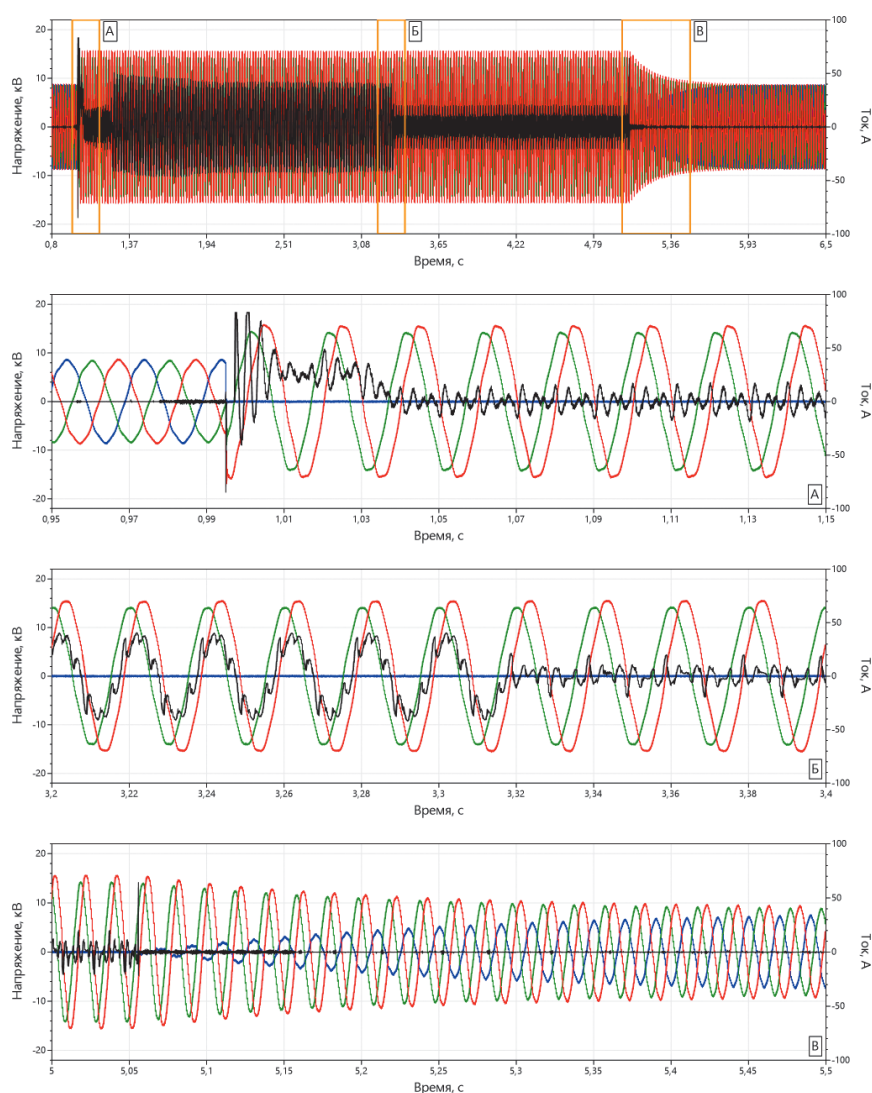


Рис. 1. Натурная осциллограмма фазных напряжений (фаза А – синий, В – зеленый, С – красный) и остаточного тока замыкания на землю (черный) в сети 10 кВ с включенным ДГР

переносного кейса со степенью защиты IP65 [6]. Производителем декларируется возможность «управления плунжерными дугогасящими реакторами в ручном или автоматическом режиме, определения расстройки компенсации, емкостных токов замыкания на землю в компенсированных сетях с любым типом реактора, оперативного определения емкости контура нулевой последовательности сети в изолированных сетях 6–35 кВ при отсутствии реактора».

Для эксплуатирующей организации прибор представляется удобным и компактным средством, которое позволит измерить емкостный ток, убедиться в работоспособности ДГР и точности настройки автоматики. Следует отметить, что метод измерения,

реализованный в устройствах [4–6], не регламентирован в РД 34.20.179 и других нормативных документах. Приборы не внесены в Государственный реестр средств измерений (СИ). С точки зрения управления и настройки ДГР это не имеет решающего значения, точность и достоверность результатов производитель может гарантировать своим именем, патентами на изобретения и зарегистрированные программы на ЭВМ, защищающими интеллектуальную собственность разработчика. Что касается измерения емкостного тока замыкания на землю в рамках выполнения требований [1], то отсутствие типа СИ в любом случае ограничивает область применения устройств ИПС датчиками или индикаторами.

## АПРОБАЦИЯ ПРИБОРА С ИНЖЕКЦИЕЙ СИГНАЛА

Для исследования переходных процессов и оптимизации режима нейтрали в схеме внутреннего электроснабжения промышленного предприятия были обследованы семь питающих подстанций класса 110 кВ, к которым подключены четыре секции 6 кВ и одиннадцать секций 10 кВ с прилегающими сетями. Для определения значений тока ОЗЗ в сетях 6–10 кВ комбината, ввиду технологических ограничений на методы с искусственным ОЗЗ и асимметрирующей емкостью, техническим руководством заказчика было согласовано применение для определения емкостного тока индикаторного микропроцессорного устройства серии ИПС. Схема подключения прибора при натурных измерениях в сети приведена рис. 2, внешний вид размещения в КРУ – на рис. 3.

Прибор позволяет проводить измерения в нормальном режиме посредством введения тестового сигнала через вторичную обмотку измерительного заземляемого трансформатора напряжения (ТН) при изолированной нейтрали или компенсации емкостного тока. По информации разработчиков, оказалось невозможно получить сертификат соответствия и зарегистрировать устройство в качестве средства измерений ввиду отсутствия требований к данному или аналогичным типам приборов, утвержденных методик по их испытаниям и поверке.

Согласно руководству по эксплуатации на ИПС, верхний предел измерения емкостного тока составляет

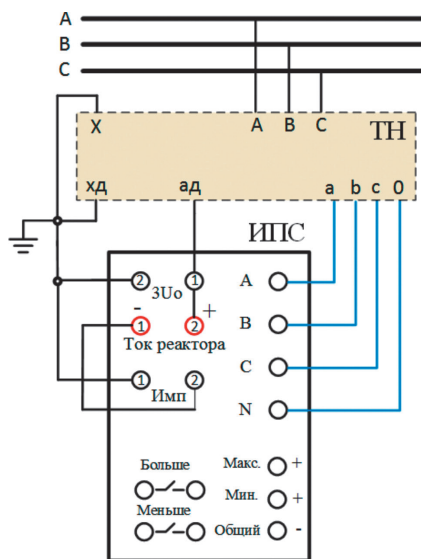


Рис. 2. Типовая схема подключения прибора ИПС в цепи трансформатора напряжения с обмоткой «разомкнутый треугольник»

120 А, нижний – (2,0–2,5) А. Из каких соображений определены указанные диапазоны измерений и как они проверены на практике, неизвестно. При этом относительная погрешность измерения емкости сети должна составлять  $\pm(3,0...3,5)\%$ , что также отмечено в РЭ, действующем на момент испытаний. Согласно обновленной информации на сайте завода-изготовителя относительная погрешность измерения емкости по параметрам ДГР в сети компенсацией составляет не более  $\pm 1,5\%$ , в сети с изолированной нейтралью по параметрам ТН – не более  $\pm 6,5\%$ .

Эксплуатационный персонал заранее должен быть ознакомлен с особенностями

применения прибора ИПС для измерения емкостного тока. В частности, неизвестно, будет ли правильно измерена емкость при наличии в сети нескольких заземляемых ТН, в том числе разного типа. Это можно пояснить следующим образом: ТН с разными параметрами индуктивности, к тому же нелинейной и насыщающейся при повышении приложенного напряжения, отличающимся омическим сопротивлением обмоток могут вызвать непрогнозируемое искажение тестового сигнала, что приведет к ошибочному результату измерения. Логично также заключить, что точность измерения емкостного тока с помощью ИПС зависит от режима нейтрали сети, поскольку степень затухания инжектируемого сигнала критично зависит от путей его стекания по связям с «землей». Следовательно, текущее значение сопротивления в нейтрали и его тип (активное, индуктивное, активно-индуктивное) имеют принципиальное значение. Это подтверждается условием производителя отключать любые резисторы в нейтрали сети перед измерением с помощью ИПС.

Остается неясным, рассчитана ли мощность блока инжекции тестового сигнала в ИПС на работу в сетях с разной добротностью и разной конфигурацией, с КЛ и ВЛ, при разных сопротивлениях заземляющего устройства в обследуемой сети и на объектах прилегающей сети. Фактические условия растекания тока вызовут разный отклик на «возмущающее» воздействие, и этот отклик будет определяться далеко не только емкостью сети на землю. Следует отметить, что в открытых источниках

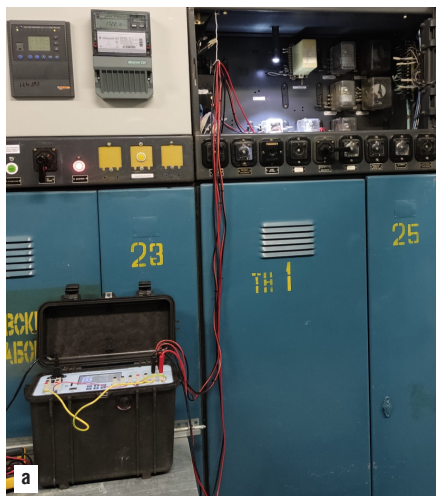


Рис. 3. Подключение прибора ИПС во вторичные цепи трансформатора напряжения (а) и лицевая панель устройства (б)



и рецензируемых журналах нет доступных сведений о задокументированных сравнительных испытаниях прибора ИПС с измерениями другими известными методами, а также о сопоставлении его показаний с расчетами емкостного тока. Верифицированные данные, подтверждающие достоверность измерений прибором ИПС емкостного тока в электрических сетях различного назначения, отсутствуют (отзывы эксплуатирующих организаций к таковым отнести нельзя). Между тем для эксплуатирующих организаций это ключ к пониманию, насколько целесообразно данный прибор применять для определения емкостного тока и исполнения норм [1].

Достоверно известно, что конструкция и характеристики ТН в разных точках сети существенно влияют на погрешность измерений прибором ИПС, поскольку стекание инжектированного в контур нулевой последовательности сигнала на землю происходит через заземленные обмотки ТН контроля изоляции. Но в самом устройстве предусмотрена возможность выбора типа только того ТН, к которому подключается прибор. То, что в прилегающей сети могут быть разные ТН, учесть уже невозможно. При этом конструкция конкретного заземляемого ТН в другой точке связанной сети, наличие в нейтрале «звезды» дополнительного трансформатора нуле-

вой последовательности для достижения антирезонансных свойств (НАМИ, НАЛИ-НТЗ), применение в ТН высоковольтных предохранителей (ЗНОЛП, ЗНОЛП(М)) с резистивными элементами – очевидно, будет критично влиять на правильность измерений с помощью прибора ИПС. Разные производители для насыщения ТН и устранения феррорезонанса используют различные демпфирующие устройства, в том числе включаемые в обмотку «разомкнутый треугольник». За счет этого затухание инжектированного сигнала также будет отличаться в разных конструкциях. Следовательно, результат измерений емкостного тока во многих случаях окажется некорректным, а степень отличия измеренного от реального или, по крайней мере, расчетного значения емкостного тока – неопределенной.

#### ПРОЦЕСС ИЗМЕРЕНИЙ

Перед проведением измерений устройством ИПС были изучены паспорт и руководство по эксплуатации на прибор, получены консультации производителя. Подключение к вторичным цепям измерительных ТН 6–10 кВ проводилось посредством присоединения измерительных проводов к клеммам в релейном отсеке ячейки ТН (рис. 3а). При подключении к вторичным цепям напряжения ТН (щупы типа «крокодил»

в комплекте проводов для подключения приборов отсутствуют, были использованы щупы от РЕТОМа) не исключен риск кратковременного закорачивания контактов разных фаз, что может вызвать отключение автомата питания, срабатывание защиты с отключением ячейки, потерю коммерческого учета, а в пределе – погасание секции. Разумеется, при аккуратном выполнении подключения риск этого существенно снижается.

Определение емкости и емкостного тока сети выполнялось путем нажатия на устройстве ИПС кнопки «▶» не более 2 с. Фиксировались показания емкости и емкостного тока сети по индикатору устройства. Для проверки достоверности отображаемых результатов измерений (рис. 3б) они повторялись 3–5 раз. Согласно руководству по эксплуатации, результат измерений не должен изменяться более чем на 5 % от измерения к измерению. В таблице 1 представлены результаты определения емкостного тока ОЗЗ в сетях 6–10 кВ обследованных подстанций.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполненные натурные измерения емкостного тока в сетях 6–10 кВ с использованием микропроцессорного устройства ИПС показали, что погрешность измерений не соответствует Ру-

Таблица 1. Сравнительные результаты измерения с помощью прибора ИПС и расчета емкостного тока ОЗЗ в сетях 6–10 кВ

№ ПС	Наименование сети	Режим нейтрали	Индуктивный ток ДГР, А <sup>1</sup>	Расчетный емк.ток с учетом конфигурации сети на момент измерений, А	Измеренный ток ОЗЗ, усредненное (по пяти измерениям) значение, А	Разница между расчетным и измеренным ИПС током (относительно расчетного), %
ПС-1	1 с.ш. 6 кВ	изолированная	–	1,04	нулевой <sup>2</sup>	–
	2 с.ш. 6 кВ	изолированная	–	0,88	1,90	115,9 %
ПС-2	1 с.ш. 6 кВ	изолированная	–	0,32	нулевой <sup>2</sup>	–
	2 с.ш. 6 кВ	изолированная	–	0,14	нулевой <sup>2</sup>	–
ПС-3	1 с.ш. 10 кВ	изолированная	–	59,2	70,8	19,5 %
	3 с.ш. 10 кВ	изолированная	–	237,7	217,9	–8,32 %
		заземлена через ДГР	200		195,9	–17,6 %
		заземлена через ДГР и резистор	185		183,1	–23,0 %
ПС-4	2 с.ш. 10 кВ	изолированная	–	237,7	216,4	–8,99 %
	2 с.ш. 10 кВ	заземлена через ДГР	202	237,7	203,4	–14,5 %
		заземлена через ДГР и резистор	205		204,7	–13,9 %
ПС-5	1 с.ш. 10 кВ	изолированная	–	2,75	7,44	170,6 %
	2 с.ш. 10 кВ	изолированная	–	2,81	9,90	252,3 %
ПС-6	1 с.ш. 10 кВ	изолированная	–	6,89	10,50	52,4 %
	2 с.ш. 10 кВ	изолированная	–	23,96	3,52	–85,3 %
	3 с.ш. 10 кВ	изолированная	–	21,97	3,20	–85,4 %
	4 с.ш. 10 кВ	изолированная	–	6,27	7,90	26,0 %
ПС-7	1+2 с.ш.	изолированная	–	237,7	235,8	–0,80 %

<sup>1</sup> Ток ДГР определялся по показаниям индикаторов положения плунжера ДГР

<sup>2</sup> Результат измерений отсутствует, прибор показывает  $I_c=0,0$  А  $dU=0,00$  В  $C=0,0$  мкФ

ководству по эксплуатации на прибор и не прогнозируема, в отличие от других методов определения токов ОЗЗ, предусмотренных РД 34.20.179 [2]. Отмечено следующее:

- полученная разница в расчетных (с учетом информации о действительном состоянии сети, т.е. отключенных в момент измерений присоединениях) и определенных с помощью прибора ИПС значениях емкостного тока в 12 случаях из 15 превышает 10 %, которые можно было бы считать допустимой суммарной погрешностью измерений;

- на ПС-1, ПС-2, в 3-х случаях прибор неоднократно, при пяти попытках измерения, проверки правильности подключения и прочих способах наладки – отображал нулевые результаты измерений, что связано, вероятно, с очень малыми значениями ожидаемого емкостного тока;

- на ПС-1 (2 с.ш.) и ПС-5, т.е. в трех случаях из 15, измеренное прибором значение емкостного тока отличается от ожидаемого расчетного более чем в 2 раза, что абсолютно неприемлемо и тогда о какой-либо точности измерений говорить не приходится в целом.

Можно было бы сказать, что причина некорректных результатов в том, что измеряемые значения емкостных токов не укладываются в заданный диапазон измерений (от 2,0–2,5 А до 120 А). Но это объяснение непригодно для 1 с.ш. 10 кВ ПС-3, всех секций ПС-5 и ПС-6, где все значения емкостного тока находятся в условленном диапазоне, и тем не менее полученный с помощью ИПС емкостный ток отличается от расчетного от 1,2 до 3,5 раз. Такой результат нельзя считать удовлетворительным. В то же время для ПС-7 емкостный ток при изолированной нейтрали был очень точно измерен прибором (разница всего –0,8 %), хотя его значение – более 230 А – существенно выходит за верхний предел 120 А измерения, заявленный в документации на прибор. Следовательно, системы здесь не наблюдаются.

В режиме заземления через ДГР в устройство ИПС заносится ожидаемый ток реактора, на который он предварительно настроен с помощью автоматики управления или вручную. Исходя из результатов измерений на ПС-3, ПС-4 (выделено синей заливкой), видно, что определяемые с помощью ИПС значения емкостного тока очень сильно зависят от внесенных в него заранее

значений тока ДГР. И судя по всему, прибор определяет ожидаемый емкостный ток как очень близкий к известному индуктивному току реактора: внесли  $I_{\text{ДГР}}=200$  А – получили  $I_{\text{с}}=195,9$  А, внесли  $I_{\text{ДГР}}=185$  А – получили  $I_{\text{с}}=183,1$  А, внесли  $I_{\text{ДГР}}=202$  – получили  $I_{\text{с}}=203,4$  А, и так далее. Учитывая существенные отличия по тем измерениям с изолированной нейтралью, где никакие значения тока не вносятся заранее, складывается мнение, что в приборе просто «зашит» принцип сверхмалого отличия отображаемого на экране емкостного тока от внесенного значения индуктивного тока. Что показательно, автоматика ДГР, работающая на том же принципе инжекции тестового сигнала, также отображает на дисплее ток настройки реактора очень близким к тому, который виден на механическом указателе на баке ДГР. Следовательно, правильно определить ток реактора таким способом – не проблема для автоматики, а вот обеспечить ее настройку на реальный емкостный ток сети с малой раскомпенсацией в нормативных пределах [1, п. 623] – сложная задача, сопряженная с большой вероятностью ошибки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Традиционные методы измерения емкостного тока, изложенные в РД 34.20.179, включают наиболее информативный способ, реализуемый с помощью искусственного замыкания на землю. На основе современных технологий цифрового осциллографирования и обработки сигналов это позволяет не просто выполнить требования ПТЭ электрических станций и сетей РФ (пп. 571, 621), но и сформировать обоснованные решения по выбору или замене оборудования для заземления нейтрали сети.

2. На основании выполненных измерений для 15 участков действующей сети 6–10 кВ показано, что прибор ИПС, отсутствующий в государственном реестре СИ, не может применяться как средство измерения в рамках выполнения требований ПТЭ электрических станций и сетей РФ по определению емкостного тока один раз в 6 лет или при существенном изменении емкости сети и замене ДГР. Эксплуатирующей организацией необходимо заранее оценить приемлемость индикативного результата при обследовании сети, а также последствия не прогнозируемых отличий

измеренного прибором емкостного тока от действительного или расчетного значения последнего.

3. Зависимость результата измерений емкости сети от гармонического состава напряжения, степени демпфирования инжектированного сигнала активной проводимости на землю, количества и характеристик ТН и других факторов для приборов серии ИПС изучена явно недостаточно. Опытная апробация в сетях 6–10 кВ промышленного предприятия не подтвердила целесообразность измерения емкостного тока с помощью этого прибора.

4. Результаты измерений, полученные с помощью прибора, следует с предельной осторожностью использовать в практических целях, исключая их применение для расчета и выбора параметров оборудования заземления нейтрали. Риск получения ошибочного результата перекрывает удобство применения и мобильность устройства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87) Типовая инструкция по компенсации емкостного тока в сетях 6–35 кВ.
3. Ширковец А.И., Ильиных М.В., Лиске А.Г. Измерение емкостных токов, токов дугогасящих реакторов, напряжений на фазах и нейтрали в опыте контролируемого замыкания на землю // Энергетик. № 11. 2023. С. 7–15.
4. Козлов В.Н., Петров М.И., Соловьев И.В. О способах выполнения автоматики управления ДГР// Релейная защита и автоматизация. 2012. № 03. С. 14–19.
5. Переносной прибор настройки ДГР и контроля изоляции «Бреслер-0107.065». [Электронный источник]. – URL: <https://old.bresler.ru/oborudovanie-zazemleniya-nejtrali/perenosnoj-pribor-nastrojki-dugogasyashchikh-reaktorov-i-kontrolya-izolyatsii>.
6. Комплекс измерения параметров сети «КИПС-03» [Электронный источник]. – URL: <http://vpprocion.ru/catalog/mikroprotessornye-ustroystva/kompleks-izmereniya-parametrov-seti-ips-01/?ysclid=mhuk2lw1q7188751818>.



Ваши сети  
под защитой

ООО «Болид»  
Новосибирск



Режимы нейтрали  
Высоковольтные резисторы  
Ограничение перенапряжений

