



## Об измерении частичных разрядов

СЕРГЕЕВ И. И., ООО «Болд»

630015, г. Новосибирск, Электrozаводской пр., д. 1

nio\_bolid@ngs.ru

Рассмотрены вопросы воздействия частичных разрядов (ЧР) на изоляцию электрооборудования, а также действующие стандарты по измерениям их характеристик. Сделаны акценты на основную характеристику ЧР — кажущийся заряд и на изменение полярности сигналов ЧР в зависимости от места включения измерительного элемента (датчика) в схеме измерений ЧР. Кратко представлена история разработки нормативных документов по измерениям ЧР. Даны предложения по актуализации ГОСТ 20074–83 [1] и указаны причины для отмены ГОСТ Р 55191–2012 (МЭК 60270:2000) [2].

**Ключевые слова:** частичные разряды, измерения, характеристики, кажущийся заряд, испытательные схемы, градуировка, калибровка, стандарты.

*«Между катодом и анодом существует больше явлений, чем это представляется вашему воображению.»  
Г. Петер (H. Raether)*

Частичные разряды — общепризнанный критерий наличия и развития неоднородностей (или дефектов) в структуре высоковольтной изоляции электротехнических изделий. Возникновение их происходит в местах, где локальная напряжённость электрического поля достигает электрической прочности среды. Действие ЧР приводит к ухудшению (иногда значительному) электрических характеристик изоляции электротехнических изделий при эксплуатации с последующим её пробоем и отказом изделия со всеми вытекающими последствиями. Измерение, обнаружение и локализация ЧР широко применяется для диагностики технического состояния изоляции оборудования, как при испытаниях в производстве, так и в условиях эксплуатации.

Частичный разряд — следствие взаимодействия разноимённых зарядов, в результате которого возникает проводящий плазменный канал, пропускающий ток или позволяющий образовывать единичный лавинный заряд (электронов и ионов). В результате последнего происходит частичная или полная нейтрализация заряда ёмкости включения (поры) с выделением энергии в канале разряда. Часть этой энергии расходуется на формирование канала разряда, а оставшаяся (большая) рассеивается в изоляции (электронно-ионная бомбардировка, излучение всех видов, термический нагрев и химические реакции).

Процессы при ЧР сопровождаются оптическими, электромагнитными, акустическими, термическими явлениями (эффlekтами), химическими реакциями и следами разрушения (воздействия) на изоляцию. Эти явления в свою очередь широко используются для обнаружения,

локализации и изучения воздействия ЧР на изоляцию. Продукты химических реакций зависят от среды, в которой происходят разряды: в воздухе — например, озон; в элегазе — химически активные и токсичные низшие фториды; в масле — горючие газы и пр.

Соотношения между частями распределения энергии разряда, прямо пропорциональной кажущемуся заряду, имеют нелинейную зависимость от среды, в которой происходит разряд, его характера, характеристик и свойств изоляционного материала. Так, например, в бумажно-масляной изоляции при интенсивности разрядов 10 – 100 пКл образуется только X-воск, а при интенсивности 1000 пКл и более остаются науглерожённые следы на бумаге [3, 4].

Впервые вопросы, связанные с неудовлетворительными объяснениями процессов пробоя изоляции, возникли в кабельной технике в начале XX века. Так, Д. Робинзон (D. Robinson) указывает: «...у некоторых инженеров создалось мнение, что пробой кабеля является каким-то таинственным процессом, происходящим внезапно, без объяснимых причин. Эвершед (Evershed), протестуя против такого мнения ещё в 1913 г., сказал: "Обычно объясняют пробой диэлектрика действием напряжения; в изоляции появляется чернотавое отверстие, и отсюда делается слишком поспешный вывод, что процесс пробоя был мгновенным и что его нельзя было предвидеть во время испытаний. Однако ничего в природе, даже при взрыве, не происходит мгновенно, и пробой изолятора происходит внезапно только в умах, не понимающих этого явления"» [5].

Применение моста Шеринга в начале 20-х годов XX века значительно повысило чувствительность при измерениях диэлектрических потерь и позволило выделить так называемые «ионизационные потери», точка резкого роста потерь от напряжения стала называться «пунктом ионизации» [6].

Отправной работой в теоретическом и экспериментальном плане исследований природы «ионизационных процессов» (так до 1968 г. идентифицировались ЧР) считается публикация А. Геманта и В. Филиппова (A. Gemant und W. Philipoff) [7].

Эксперименты, проведённые на установке согласно схеме на рис. 1, позволили им установить дискретный и дуговой характер возникновения разрядов (рис. 2), получить ряд зависимостей, предложить теоретический расчёт числа разрядов в периоде  $N$  от приложенного напряжения. Следует отметить, что практически они наблюдали отклонение числа разрядов при росте напряжения от расчётной зависимости.

Последующие исследования А. Остена и В. Хэкетта (A. Austen and W. Hackett) [8] привели к разработке идеализированной трёхёмкостной модельной схемы замещения диэлектрика с порой (включением) на переменном напряжении (рис. 3). Характеристика ЧР в такой схеме — «кажущийся заряд», который может быть измерен. Значение кажущегося заряда  $q$  равно произведению скачка напряжения на выводах  $\Delta U$  на ёмкость испытываемого объекта  $C_x$  ( $q = \Delta U C_x$ ). Это примерно соответствует  $q \approx \Delta U C_a$ , поскольку ёмкости  $C_c$  и  $C_b$  очень малы по сравнению с  $C_a$ .

Из анализа схемы (см. рис. 3) следует, что соотношение между истинным зарядом, нейтрализуемым в поре  $q_c = \Delta U C_c$ , и кажущимся  $q$  зависит от соотношения ёмкостей  $q = q_c [C_b / (C_c + C_b)]$ . Кажущийся заряд  $q$  всегда намного меньше истинного заряда  $q_c$ , нейтрализуемого в поре (включении). Это соотношение в пределе стремится к единице, что возможно при полном разряде (пробое) изоляции объекта испытаний, и кажущийся заряд не может

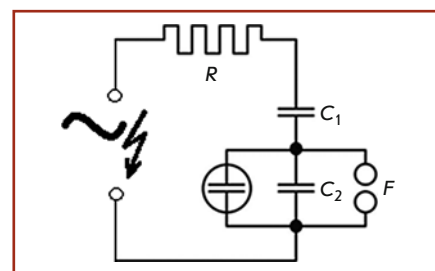


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема испытаний А. Геманта и В. Филиппова:  $R$  — защитный резистор в высоковольтной цепи;  $C_1$  — последовательно включённая ёмкость;  $C_2$  — ёмкость, подключаемая параллельно искровому промежутку  $F$  и вертикально отклоняющим обкладкам осциллографа

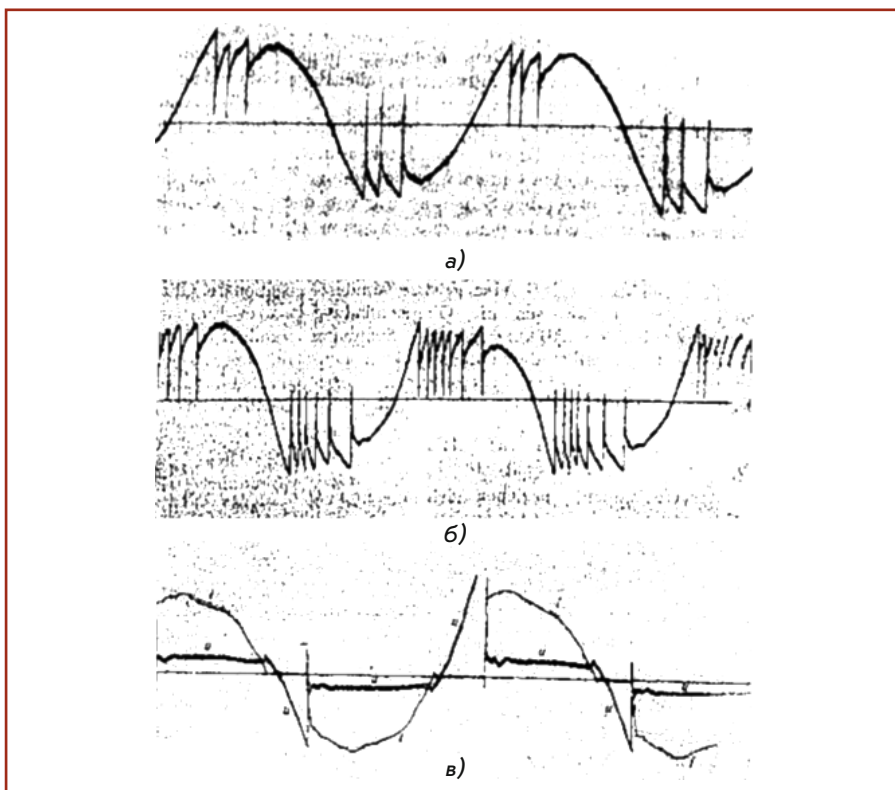


Рис. 2. Осциллограммы напряжений на искровом промежутке согласно схеме испытаний (см. рис. 1) при разных числах разрядов в периоде: а —  $N=6$ ; б —  $N=14$ ; в —  $N=2$

превышать заряд ёмкости объекта испытаний  $Q_x$  при текущем значении напряжения на нём  $U_x$ , т. е.  $q \leq (Q_x = C_x U_x)$ .

Испытательная схема и её градуировка при измерениях ЧР представлена на рис. 4 [9]. Следует отметить, что при включении измерительного элемента  $Z_m$  в цепь объекта испытаний полярность импульсного сигнала меняется на противоположную. Это явление широко используется для определения места возникновения ЧР, отстройки от помех в балансной схеме и схеме различения (дискриминации) полярности импульсов.

На рис. 5 представлены схемы регистрации ЧР и их градуировки, широко применявшиеся ранее, по Г. С. Кучинскому [10, 11]. Подробный анализ схем измерений и индикации ЧР с историческим обзором приведён у С. Л. Эпштейна [12].

В настоящее время измерения ЧР в изоляции различных видов электро-технического оборудования и аппаратов (трансформаторов, реакторов, ограничителей перенапряжения, силовых кабелей, вращающихся машин и пр.) регламентированы многочисленными международными и национальными стандартами и соответствующими нормативно-техническими документами в основном при испытаниях в условиях изготовителя продукции, например, [13, 14] и пр. Вопросы измерения характеристик ЧР в изоляции электрооборудования, находящегося в эксплуатации, как правило, этими нормативными документами не рассматриваются.

Первым основополагающим нормативным документом по измерению и обнаружению ЧР при высоковольтных испытаниях изоляции стали рекомендации МЭК [15]. Проект рекомендаций опубликован ещё в 1959 г. [11]. Следует отметить, что все стандарты МЭК издаются на английском и французском языках и

имеют равную юридическую силу. Тексты их эквивалентны, аутентичны, но не идентичны. Следует отметить, что у Национального комитета СССР было право издавать рекомендации (стандарты) МЭК на русском языке.

Второе издание вышло уже в качестве стандарта МЭК [16, 17]. В 1991 г. он перенумерован в стандарт МЭК 60270 (1981). Третье издание уже в качестве Международного (интернационального) стандарта МЭК 60270:2000 [18] вышло существенно переработанным с учётом применения цифровых измерительных устройств ЧР и поверки градуировочных устройств (калибраторов). В ноябре 2015 г. к стандарту МЭК 60270:2000 [18] вышли Изменения 1 [19].

Первый отечественный стандарт по измерению ЧР — ГОСТ 20074-74 [20], который с учётом рекомендаций МЭК [15] разработан в 1974 г. и действовал с 01.01.1977 г. до 01.01.1982 г. После выхода второй редакции стандарта МЭК

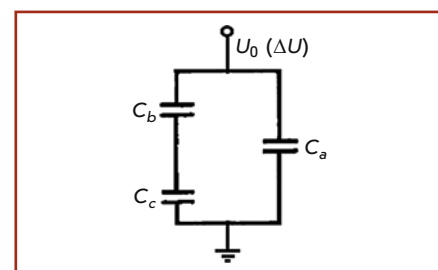


Рис. 3. Модельная схема замещения конденсатора (диэлектрика) с порой:

$C_a$  — общая ёмкость, шунтирующая пору (включение);  $C_b$  — ёмкость, включённая последовательно с порой;  $C_c$  — ёмкость поры (включения);  $U_0$  — напряжение на конденсаторе;  $\Delta U$  — скачок напряжения на конденсаторе после разряда в пору

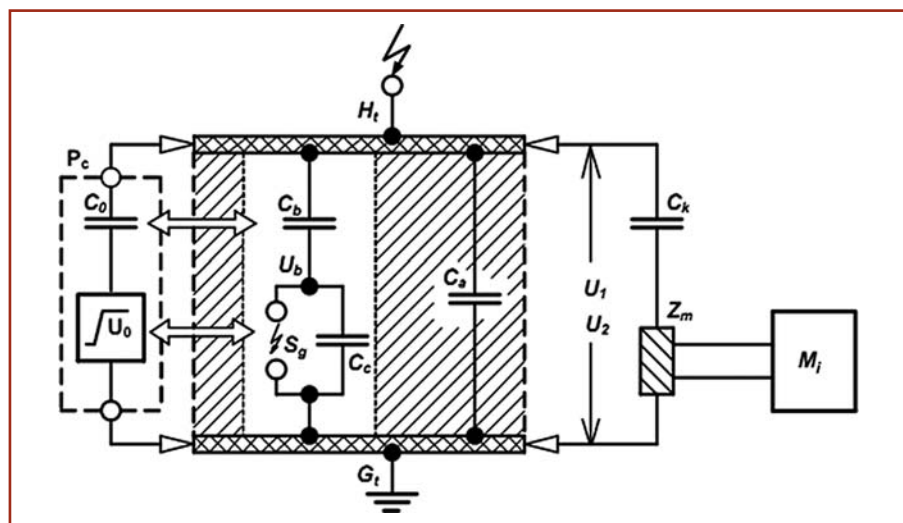


Рис. 4. Эквивалентная испытательная схема при градуировке по кажущемуся заряду:

$C_a$  — эффективная ёмкость объекта испытаний;  $C_b$  — ёмкость, включённая последовательно с источником ЧР (порой);  $C_c$  — ёмкость поры (включения — источника ЧР);  $C_0$  — ёмкость, последовательно соединённая с калибратором (градуировочная);  $S_g$  — искровой промежуток;  $P_c$  — калибратор ЧР (градуировочное устройство ЧР);  $C_k$  — разделительный конденсатор (связи);  $Z_m$  — измерительный элемент (датчик);  $U_0, U_b, U_1, U_2$  — амплитуды (скачки) напряжения, созданные калибратором, а также на ёмкости  $C_a$  при калибровке (градуировке) и возникновении ЧР соответственно;  $H_t$  — вывод объекта испытаний для подключения высокого напряжения;  $G_t$  — вывод заземления объекта испытаний;  $M_i$  — измерительный прибор ЧР

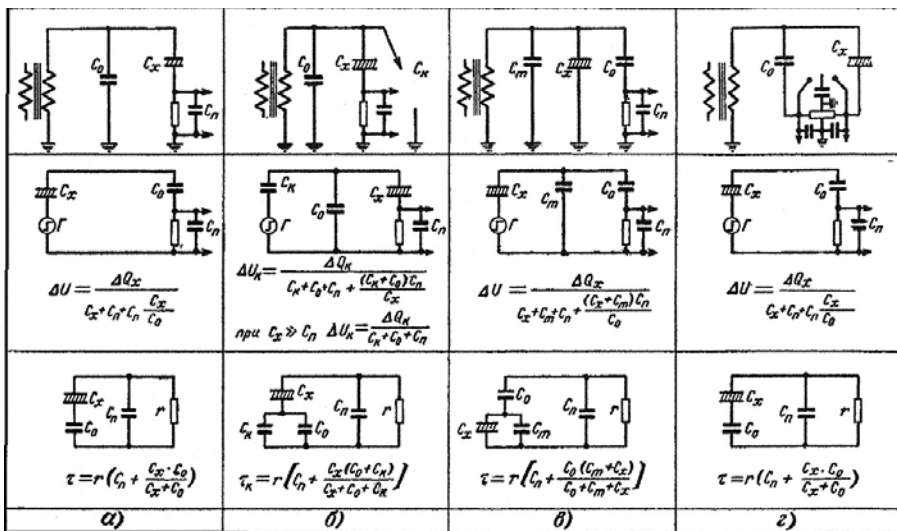


Рис. 5. Схемы регистрации ионизационных процессов:

а — схема измерения ВЧ составляющих тока в образце; б — то же при наличии короны; в — схема с конденсатором связи; г — мостовая схема;  $C_x$  — испытуемый объект;  $C_0$  — эталонная ёмкость;  $C_{\text{п}}$  — паразитная ёмкость входа индикаторной части схемы;  $C_{\text{т}}$  — паразитная ёмкость ошиновки и испытательного трансформатора;  $C_{\text{к}}$  — ёмкость коронирующего электрода на землю

[17] делегацией СССР в Постоянной комиссии по сотрудничеству в области стандартизации выпущен стандарт СТ СЭВ 3689–82 [21], утверждённый комиссией в июле 1982 г.

В 1983 г. с тем же названием разработан ГОСТ 20074–83 [1] (взамен ГОСТ [20]) с указанием о полном соответствии стандарту [21] и МЭК [17], который действует с 01.07.1984 г. по настоящее время. В 2012 г. разработан национальный стандарт РФ ГОСТ Р 55191–2012 (МЭК 60270:2000) [2], модифицированный по отношению к международному стандарту [18].

В настоящее время сложилась парадоксальная ситуация по измерениям ЧР — действуют одновременно два ГОСТ [1] и [2]. В последнем в предисловии указано, что внесены «... дополнительные положения, учитывающие потребности национальной стандартизации (на базе ГОСТ 20074–83 “Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов”), выделены курсивом». В официальном тексте ГОСТ [2] такие выделения курсивом отсутствуют.

Анализ ГОСТ [2] вызывает критические замечания к его тексту. Положительным можно считать наличие, хотя и запоздалое, официальной версии, дающей общее представление о стандарте МЭК [18] и изменениях по сравнению со стандартом МЭК [17].

Недостатки изданной редакции ГОСТ [2]:

- допущена небрежность в оформлении документа, например, при объёме свыше 40 страниц отсутствует содержание, что затрудняет пользование им и не соответствует оригинальной версии и требованиям ГОСТ [22, 23];
- отдельные положения рассматриваемого стандарта противоречат действующему ГОСТ [1], например:

«Настоящий стандарт устанавливает метод измерения характеристик частичных разрядов при испытании изоляции электрооборудования напряжением переменного тока свыше 1000 В частотой до 1200 Гц и напряжением постоянного тока свыше 1000 В» [Прембула].

«Настоящий стандарт распространяется на измерение характеристик частичных разрядов при испытании изоляции электрооборудования напряжением переменного тока промышленной частоты до 400 Гц действующим значением свыше 1000 В и напряжением постоянного тока свыше 1000 В» [2]. В оригинале стандарта МЭК [18] указано, что он применим для измерения ЧР в электрических аппаратах, компонентах или системах при испытаниях переменным напряжением до 400 Гц или на постоянном напряжении;

- не согласуются требования по диапазону рабочих частот при измерениях ЧР, требования к градуировочному генератору и ряд других.

Кроме того, в ГОСТ [2] введены дополнительные термины, которые отсутствуют в ГОСТ [1].

Так, в разделе «3.3 величины, относящиеся к импульсным частичным разрядам (характеристики ЧР) (quantities related to partial discharge pulses)» [2] введены новые термины, рассмотренные далее.

1. «3.3.3.1 цикл измерения ЧР  $T_C$  ( $T_{\text{ref}}$ ) (PD measurement cycle): Интервал времени с начала измерения и до окончания измерения ЧР с или  $n_c$  — число периодов испытательного переменного напряжения в интервале времени измерения ЧР», который сам себе противоречит, так как единица измерения времени — секунда, а число периодов — безразмерный параметр.

Далее это противоречит пункту «3.3.5 средний ток частичного разряда  $I$ » (допущена опечатка, должно быть: средний ток частичных разрядов), в котором  $T_{\text{ref}}$  определён как «выбранный опорный интервал времени». В тексте и формуле пункта «3.3.6 мощность разряда  $P$ » (также опечатка, должно быть: мощность разрядов  $P$ )  $T_{\text{ref}}$  заменено на  $T_C$ , а в пункте «3.3.7 квадратичный параметр  $D$ » (во всех предыдущих русскоязычных стандартах и переводах стандарта МЭК этот термин называется «квадратичный параметр  $D$ ») замена произведена в тексте, а в формуле осталась  $T_{\text{ref}}$ .

2. «3.3.6.1. энергия единичного ЧР (energy of single PD, W)» — параметр, который отсутствует в ГОСТ [1], исключён в оригинале стандарта МЭК [18] и в редакции этого стандарта [17]. Кроме того, отсутствуют какие-либо указания по его практическому определению.

3. «3.3.9.1 показатель повторения ЧР максимального значения кажущегося заряда  $q_{\text{max}} R_C$  (recurring PDs factor): Показатель, указывающий на отношение периодов испытательного переменного напряжения, в которых возникают ЧР максимального значения кажущегося заряда, к общему количеству периодов в одном цикле измерения. Примечание — Показатель  $R_C$  находится в диапазоне от 0,0 до 1,0. Значение  $R_C = 0,0$  соответствует регистрации единичного импульсного сигнала ЧР (или сигнала помех); Значение  $R_C = 1,0$  соответствует зарегистрированным ЧР в каждом периоде напряжения.»

Данный показатель отсутствует в стандартах МЭК и редакциях ГОСТ [1] и не имеет практического значения из-за своего ограничения при возникновении в каждом периоде более одного разряда. Широко применяемые на практике частотные распределения ЧР (в периоде испытательного напряжения или общее число разрядов) в зависимости от значения кажущегося заряда за время измерений (двух- или трёхмерные амплитудно-фазовые частотные распределения) — более информативны.

4. «3.11 калибровка (градуировка) измерительного прибора: Установление количественного соотношения (масштабного коэффициента) между показаниями отсчетного устройства измерительного прибора и соответствующими измеряемыми характеристиками частичных разрядов в полностью укомплектованной установке с включенным объектом.»

Данный термин с частичными изменениями заимствован из стандарта [21] (Приложение 1, термин «Градуировка»).

5. «3.13 калибровочное (градуировочное) устройство: Устройство, состоящее из калибратора ЧР, генерирующего калиброванные характеристики частичных разрядов, и используемое при калибровке (градуировке) измерительного прибора (системы, устройства) ЧР.»

Этот термин в искажённом виде заимствован из ГОСТ [1] (Приложение 1, п. 16), а его «закольцованность» нарушает его смысловое восприятие.

В ГОСТ [1] термин и определение даны в следующем виде:

«16 Градуировочное устройство: Устройство, состоящее из включённых последовательно градуировочного генератора  $G$  и поверочного (градуировочного) конденсатора ёмкостью  $C_0$ , генерирующая градуировочные (поверочные) импульсы и используемая при градуировке (поверке) измерительного прибора (устройства). Конденсатор может быть встроен в генератор  $G$ .» (Окончания в оригинале подчеркнуты автором.)

Главный недостаток изданной редакции ГОСТ [2] — наличие многочисленных неточностей (неэквивалентного) перевода и дополнений текста стандарта МЭК [18], которые искажают смысл текста. Далее приведено несколько примеров.

**Пример 1.** Термин: «3.4 максимальная амплитуда повторяющегося частичного разряда (*largest repeatedly occurring PD magnitude*): Наибольшая амплитуда, зарегистрированная измерительной системой, имеющей достаточную передаточную характеристику в соответствии с требованиями 4.3.3. Понятие максимальная амплитуда повторяющегося частичного разряда не применяется для испытаний на напряжении постоянного тока.»

В оригинале имеем следующий текст: «3.4 *largest repeatedly occurring PD magnitude* — largest magnitude recorded by a measuring system which has the pulse train response as specified in 4.3.3. The concept of the largest repeatedly occurring PD magnitude is not applicable to tests with direct voltage» [18].

Более точным (эквивалентным) представляется следующий перевод этого термина: «3.4 наибольшая амплитуда повторно возникающих ЧР — наибольшая амплитуда, зарегистрированная измерительной системой, имеющей реакцию (отклик) на последовательность импульсов в соответствии с п. 4.3.3. Представление (понятие) о наибольшей амплитуде повторно возникающих ЧР не применимо при испытаниях на постоянном напряжении».

В оригинале нет слова «максимальный» ни в самом термине, ни в п. 4.3.3. Оригинальный текст пункта 4.3.3 [18]: «4.3.3 *Pulse train response of instruments for the measurement of apparent charge*». В стандарте [2] он переведён следующим образом: «4.3.3 *Передаточная характеристика приборов для измерения кажущегося заряда*». Представляется более точным и эквивалентным по смыслу перевод: «Реакция (отклик) прибора для измерения кажущегося заряда на последовательность периодических импульсов».

Далее в рассматриваемом пункте стандарта МЭК [18] уточняются эти определения и требования, которые должны выполняться:

«In addition, it is particularly recommended that an indicating instrument or recorder should be used to quantify the largest repeatedly occurring PD magnitude. The reading of such instruments, when used in testing with alternating voltage, should be based on an analogue peak detection circuit, or digital peak detection by software, with a very short electrical charge time constant and an electrical discharge time constant not larger than 0.44 s. Independent of the type of display used in such instruments, the following requirements apply:

The response of the system to a pulse train consisting of equally large equidistant pulses  $q_0$  with a known pulse repetition frequency  $N$ , shall be such that the reading  $R$  of the instrument indicates magnitudes as given in the following table. The range and gain of the instrument is assumed to be adjusted to read full scale or 100% for  $N = 100$ . The calibrator used to produce the pulses shall conform to the requirements of clause 5» [18].

Перевод этих положений в стандарте [2]:

«Кроме того, рекомендуется использовать индикатор или регистратор для определения амплитуды максимального (выделено автором) повторяющегося частичного разряда. Показание таких приборов при испытании напряжением переменного тока следует выполнять с помощью аналоговой схемы детектирования (обнаружения, определения) пика или путём цифрового определения пика по программе с малой постоянной времени заряда. Постоянная времени регистрируемого импульса ЧР должна быть не более 0,44 с. Независимо от типа дисплея, используемого в таких приборах, должны выполняться следующие требования:

- передаточная характеристика измерительной системы на последовательность равно и далеко отстоящих друг от друга импульсов с одинаковыми амплитудами, равными  $q_0$ , с частотой повторения  $N$ , должна быть такой, чтобы показание  $R$  прибора указывало амплитуды в соответствии с приведенной таблицей 1;

- диапазоны и коэффициент усиления прибора должны быть отрегулированы таким образом, чтобы для  $N = 100$  показание охватывало бы всю шкалу или 100 %;

- калибровочное устройство, применяемое для создания импульсов, должно соответствовать требованиям раздела 5.»

«Table 1. *Pulse train response of PD instruments*» [18].

Из сравнения видно, что ключевые слова в заголовке п. 4.3.3 и в таблице 1 одни и те же, поэтому должны быть переведены одинаково. Тогда название таблицы следующее: «Реакция (или отклик) измерительного прибора ЧР на последовательность периодических импульсов».

Таблица 1. Характеристика чувствительности приборов измерения ЧР при серии импульсов [2].

$N$ (1/с)	1	2	5	10	50	$\geq 100$
$R_{min}$ (%)	35	55	76	85	94	95
$R_{max}$ (%)	45	65	86	95	104	105

В таблице 1 указана частота следования периодических импульсов  $N$  постоянного заряда  $q_0$ , и какими при этом должны быть минимальные  $R_{min}$  и максимальные  $R_{max}$  значения показаний (реакция) измерительного прибора ЧР. В тексте до этого момента указано, что калибратор (градуировочное устройство), генерирующий импульсы, должен соответствовать требованиям пункта 5. Приведённые цитаты (оригинальные и их переводы) пункта 4.3.3 и термина по пункту 3.4 показывают, что разработчики стандарта не дают эквивалентного перевода текстов, которые отражают смысл термина, его применения и происхождения.

В оригинальном тексте речь идёт о том, что в процессе измерений (за время не менее 1 с) измерительным прибором (системой) регистрируется не «максимальная амплитуда повторяющегося частичного разряда», а некоторая «наибольшая амплитуда повторно возникающих ЧР».

**Пример 2.** О точности перевода из раздела 11.

#### «11.5.1 Choice of test procedures»

The procedures described for alternating voltage to determine the PD inception and extinction voltages are generally not applicable for tests with direct voltage as the stress on the dielectric during voltage rise and decrease is different from that during the period when the voltage is constant» [18].

Ему соответствует текст перевода в стандарте [2]:

#### «11.5.1 Выбор метода испытания»

Метод определения напряжения возникновения и погасания ЧР для переменного тока обычно не применяют для испытаний постоянным током, поскольку механическое напряжение в диэлектрике в период подъёма и снижения напряжения отличается от механического напряжения в течение периода, когда напряжение постоянно».

Более точным представляется следующий перевод этого текста:

#### «11.5.1 Выбор методики испытаний»

Методики по определению напряжений возникновения и погасания ЧР, описанные для переменного напряжения, обычно не применяются для испытаний на постоянном напряжении, поскольку напряжение на диэлектрике во время повышения и снижения различное в течение его периода, чем отличается, когда напряжение остаётся постоянным».

«Механическое напряжение в диэлектрике» здесь совершенно неуместно.

**Пример 3.** В стандарте МЭК [18] введён термин:

«3.11 *scale factor  $k$*  — factor by which the value of the instrument reading is to be

multiplied to obtain the value of the input quantity (IEC 60060-2:1994, 3.5.1)».

Его перевод в стандарте [2]:

«3.12 масштабный коэффициент  $k$  (scale factor  $k$ ): Коэффициент, на который следует умножить значение, измеренное устройством присоединения измерительной системы или измерителем ЧР в виде амплитудного значения импульса напряжения, для получения значения входной величины в виде кажущегося заряда (ГОСТ Р 55193)».

В данном случае по сравнению с оригиналом и ГОСТ [24], на который сделана ссылка, имеется несколько неточностей. Так по ГОСТ [24] существуют следующие термины и их определения (пояснения):

«3.3.1 масштабный коэффициент измерительной системы (scale factor of a measuring system): Число, на которое должно быть умножено считанное значение показания прибора, чтобы получить значение входной величины, поданной на измерительную систему;

3.3.4 масштабный коэффициент измерительного прибора (scale factor instrument): Число, на которое должно быть умножено показание прибора, чтобы получить значение величины на его входе».

Отсюда следует, что должно быть: «коэффициент — это число...», а не «коэффициент — это коэффициент...». Далее указано: «...измеренное устройством присоединения измерительной системы или измерителем ЧР в виде амплитудного значения импульса напряжения, для получения значения входной величины в виде кажущегося заряда», чего в оригинальном тексте нет, а есть общее определение масштабного коэффициента независимо от измеряемой характеристики (кажущийся заряд, средний ток, квадратичный параметр).

Кроме того, ГОСТ [25] включает в себя значение и определение термина: «Устройство сопряжения (присоединения) — устройство, предназначенное для соединения и разъединения изделия и СТД [средств технического диагностирования — отмечено автором] (электрический соединитель, переходник, штуцер и др.)». Например, вывод прибора измерения напряжения на высоковольтном вводе (трансформатора, реактора), к которому может подключаться измерительный прибор. В данном случае это вывод объекта испытаний или соединительного конденсатора для подключения измерительного элемента (датчика).

Рекомендуемый перевод термина: «3.12 масштабный коэффициент  $k$  — число (множитель), значение которого умножается на показания прибора, чтобы получить значение входной величины».

**Пример 4.** Приложение А в стандарте МЭК [18]: «Annex A (normative) Performance test on a calibrator». Его перевод в стандарте [2]: «Приложение А (обязательное) Калибровка калибратора характеристик ЧР».

Наименование приложения должно быть переведено в соответствии с терминологией, принятой в измерительной технике и метрологии и контекстом: «Проверка калибратора» или «Методики проверки калибратора», поскольку в тексте приложения рассматриваются две методики (procedures) проверки его характеристик.

В оригинале стандарта МЭК [18] отсутствует перечень ключевых слов. В нём они постоянно выделяются в тексте каждого пункта, а в изданном варианте стандарта из приведённых в конце текста десятки ключевых слов не все являются таковыми. Представляется, что использование приёма с выделением ключевых слов в тексте весьма целесообразно в издании стандартов.

Исходя из вышеизложенного, предлагается ГОСТ [2] отменить. Рекомендуется стандарт IEC 60270:2015 Ed 3.1 опубликовать на русском языке в виде официального перевода стандарта МЭК, как они издавались ранее [15, 16], а не в качестве национального стандарта с той или иной степенью соответствия стандарту МЭК [18].

Аргументацию Г. С. Бокова, изложенную в [26]: «Методологически неверно копировать зарубежные стандарты» можно дополнить следующим:

- при создании любого стандарта используются определённые источники, часто сопровождаемые различными разъяснениями. Технический стандарт, например ГОСТ [13], разрабатывается на основании обширных научно-исследовательских работ. Основополагающий стандарт МЭК [18] по измерениям частичных разрядов имеет ссылки на другие стандарты МЭК и последующий специальный пояснительный доклад [9] с обширной библиографией, значительная часть источников которого недоступна для широкого круга отечественных специалистов;

- стандарт МЭК периодически перерабатывается или для него выходят уточнения, например [19], результат которых — внесение изменений в национальный стандарт, обуславливающих дополнительные затраты и ресурсы;

- использование в качестве национального стандарта только МЭК [18] в модифицированном виде или с другой степенью соответствия ведёт к отставанию внедрения и принижению достижений отечественной науки и техники по данному вопросу.

Кроме того, каждая зарубежная публикация содержит ещё и коммерческий интерес. В качестве примера можно назвать стандарт IEEE Std 400-2001 [27], где в табл. 1 приведены скорости роста электрических трингов в кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена при различных воздействующих испытательных напряжениях по отношению к номинальному напряжению кабеля для частоты 0,1 и 50 Гц.

При напряжении  $3U_0$  ( $U_0$  — фазное напряжение) скорость роста трингов составляет 2,2 мм/ч на частоте 50 Гц и 10,9 – 12,6 мм/ч на частоте 0,1 Гц. При напряжении  $2U_0$  — скорости сопоставимы, а при  $4U_0$  на частоте 50 Гц скорость роста достигает 175 – 611 мм/ч, для 0,1 Гц — 58,3 – 64,2 мм/ч.

Физически это ничем не объясняется, хотя и не соответствует принятым и обоснованным методикам усредненного электрического старения, согласно которым старение изоляции прямо пропорционально частоте приложенного напряжения в диапазоне частот до нескольких килогерц. В данном случае идёт «научное лоббирование» коммерческого интереса по широкому внедрению технических средств для метода измерений ЧР на сверхнизких частотах 0,1 – 0,01 Гц.

Во всех существующих стандартах по измерениям ЧР отсутствуют блок по оформлению и представлению результатов измерений, а также требования по числу периодов испытательного напряжения (или времени), в течение которого производится непрерывное измерение характеристик ЧР. Представляется, что число периодов в одном измерении должно быть не менее 50 – 60, а число измерений — не менее 5.

При актуализации ГОСТ [1] рекомендуется учесть следующие предложения:

- дополнить цели измерения ЧР пунктом — определение (локализация) места возникновения ЧР в испытываемом объекте;
- динамический диапазон измерений характеристик ЧР у измерительных приборов должен быть не менее 60 дБ, общий диапазон измерений — не менее 80 дБ;
- ввести в качестве характеристики сигналов ЧР — полярность импульсов по отношению к фазе испытательного напряжения при включении измерительного элемента в цепь соединительного конденсатора;
- ввести в качестве обязательной характеристики ЧР, подлежащей измерению, отдельно суммарный заряд по отрицательным и положительным полупериодам испытательного напряжения за время измерений по аналогии со стандартом IEEE [14];
- определить допустимую погрешность измерений характеристик ЧР;
- исключить из стандарта применение измерителей помех для измерения характеристик ЧР (применять их только для обнаружения ЧР);
- указать особенности измерений характеристик ЧР в кабелях и объектах с обмотками;
- ввести раздел по методу (методам) измерения мощности разрядов (при измерениях ЧР в полном периоде испытательного напряжения);
- указать, что при измерениях ЧР во временном окне средний ток разрядов не имеет значения (следует измерять суммарный заряд);
- ввести разделы по обработке результатов измерений и их особенностям в условиях эксплуатации.

## Выводы

1. Национальный стандарт ГОСТ Р 55191–2012 (МЭК 60270:2000) «Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов» [2] необходимо отменить по указанным в статье причинам.

2. Стандарт МЭК 60270:2015 в редакции 3.1 [19] следует опубликовать на русском языке в виде официального перевода, как ранее издавались его первая и вторая редакции.

3. Необходимо провести актуализацию существующего стандарта ГОСТ 20074–83 (СТ СЭВ 3689–82) «Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов» [1] с учётом обновлённой редакции 3.1 стандарта МЭК 60270:2015 [19], уровня развития цифровой измерительной техники, компьютеризации процессов обработки информации и изложенных предложений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 20074–83 (СТ СЭВ 3689–82). Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. — М.: ГК СССР по стандартам. — 22 с.

2. ГОСТ Р 55191–2012 (МЭК 60270:2000). Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов, 2014.

3. Клейн А. А. Повреждение маслобарьерной изоляции частичными разрядами // Электротехническая промышленность. 1969. Вып. 938. С. 24 – 30.

4. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. — Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. — 224 с.

5. Робинзон Д. М. Диэлектрические явления в кабелях высокого напряжения // Пер. с англ. Е. К. Доберер, Н. А. Покровский. — Л. – М.: ГЭИ, 1941. — 199 с.

6. Брагин С. М., Вальтер А. Ф., Семёнов Н. Н. Теория и практика пробоя диэлектриков. — М. – Л.: Государственное изд-во, 1929. — 383 с.

7. Gemant A., Philippoff W. Die Funkenstrecke mit Vorkondensator // Zeitschrift für Techn. Physik. 1932. Vol. 13. No. 9. S. 425 – 430.

8. Austen A. E. W., Hackett W. Internal Discharges in Dielectrics: Their Observation and Analysis // S. Journ. Inst. Electr. Eng. 1944. Vol. 91. Part 1. P. 298 – 312.

9. Guide for Partial Discharge Measurements in compliance to IEC 60270 / Lemke E., Belijn S., Gulski E. et. al. // Technical Brochure 366 of Cigre Working Group D1.33.2008. P. 1 – 55.

10. Кучинский Г. С., Таупере О. О. Регистрация ионизационных характеристик изоляции // Электричество. 1960. № 11. С. 42 – 48.

11. Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях / М. А. Грейсук, Г. С. Кучинский, Д. А. Каплан, Г. Т. Месерман. — М. – Л.: ГЭИ, 1963. — 299 с.

12. Эпштейн С. Л. Измерение характеристик конденсаторов. 2-е изд. доп. и перераб. — Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1971. — 218 с.

13. ГОСТ 1516.3–96. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности, 1998.

14. IEEE Std 1434–2000 (2014). IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery, 2014.

15. Рекомендации МЭК. Публикация 270. 1-е изд. — М.: Информэлектро, 1972. — 36 с.

16. Стандарт МЭК. Публикация 270. 2-е изд. 1981. Измерения частичных разрядов. — М.: Изд-во. стандартов, 1985. — 32 с.

17. IEC Standard Publication 270. Second edition. Partial discharge measurements, 1981.

18. International Standard IEC 60270. Third edition. High-voltage test techniques-Partial discharge measurements, 2000.

19. IEC 60270 (2000). Amd. 1 (2015) High-voltage test techniques — Partial discharge measurements. Amendment 1, 2000.

20. ГОСТ 20074–74. Электрооборудование и изоляция на напряжение свыше 1000 В. Методы измерения характе-

ристик частичных разрядов. — М.: ГК Стандартов СМ СССР, 1974.

21. Стандарт СЭВ СТ СЭВ 3689–82. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов, 1982.

22. ГОСТ Р 1.5–2004. Стандартизация в РФ. Стандарты национальные РФ. Правила построения, изложения, оформления и обозначения, 2004.

23. ГОСТ 1.5–2001. Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению, 2001.

24. ГОСТ Р 55193–2012. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением, 2014.

25. ГОСТ 26656–85. Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования, 1985.

26. Боков Г. С. Зачем нужна стандартизация? // Энергоэксперт. 2015. № 6(53). С. 22 – 28.

27. IEEE Std 400–2001. IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems, 2002.



## Диагностика изоляции силового кабеля

МАШКАЛЁВ Д. А., ООО «Болид»

630015, г. Новосибирск, Электровзводская ул., д. 2, корп. 6  
efl\_bolid@mail.ru

Рассмотрены основные нарушения при монтаже кабельных линий (КЛ), которые впоследствии могут привести к появлению дефекта и выходу кабеля из строя. Предложены критерии оценки текущего состояния изоляции КЛ на основании многолетнего опыта работы. Рассмотрена перспектива использования метода диагностики КЛ без вывода из эксплуатации и на рабочем напряжении.

Ключевые слова: кабельные линии, сшитый полиэтилен, диагностика, критерии оценки изоляции, средний класс напряжения.

Переход на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) в России при проектировании новых КЛ и реконструкции уже существующих объектов в настоящее время приостановлен. Сейчас можно констатировать, что потребность в кабеле с пропитанной бумажной изоляцией (ПБИ) снизилась всего на 7 – 8 %. Это связано с тем, что 15 % кабелей со СПЭ-изоляцией приходится ремонтировать уже через один-два года.

Известно, технические характеристики СПЭ-изоляции имеют неоспоримые преимущества перед характеристиками ПБИ. Так почему же эксплуатирую-

щие организации вынуждены принимать порой экстренные меры по ремонту относительно недавно введённого в эксплуатацию кабеля?

В ООО «Болид» уже пять лет успешно функционирует кабельная диагностическая лаборатория австрийской компании Вауг. За это время в лаборатории исследовано более 610 кабелей со СПЭ-изоляцией и более 330 кабелей с ПБИ среднего класса напряжения. При этом использовались методы измерения тангенса угла диэлектрических потерь  $\tan \delta$  и локализации частичных разрядов (ЧР), которые реализованы с помощью аппаратуры лаборатории.