

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.31+681.5

### ДИСКРЕТНАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОЖЕСТВА ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

© Н. В. Киншт, Н. Н. Петрунко

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5  
E-mail: kin@dvo.ru*

Предлагается задача диагностики дефектов в изоляции высоковольтного электрооборудования на основе мониторинга частичных разрядов (ЧР), которые недоступны для прямых измерений, но являются основным диагностическим признаком дефектов. Рассматриваются вопросы построения диагностической модели дефекта в изоляции как источника серий ЧР и задача дифференциальной диагностики отдельных дефектов на основе интерпретации интегральной картины ЧР как множества доступных измерению моментов времени единичных ЧР. Для диагностики привлекается идея математической задачи покрытия множества. Рассмотрен модельный пример.

*Ключевые слова:* диагностика, дефект, высоковольтное оборудование, частичные разряды, математическое моделирование, задача покрытия.

DOI: 10.15372/AUT20210210

**Введение.** Объектом представленного исследования являются частичные разряды (ЧР) в изоляции элементов ответственного высоковольтного оборудования (ВВО). Частичные разряды возникают и проявляются как в потенциальных дефектах изоляции и способствуют их развитию, так и при нормальной работе элементов ВВО и являются важнейшим диагностическим признаком, однако недоступны для прямых измерений [1, 2].

Диагностика ЧР в элементах ВВО в условиях эксплуатации представляет собой высоковольтный электрофизический эксперимент, интерпретация которого нуждается в адекватных математических моделях и методах. В реальности ЧР возникают во множестве дефектов с априори неизвестными электрофизическими параметрами и имеют с ними существенные взаимосвязи. Эти взаимосвязи должны учитываться при обработке результатов мониторинга ЧР, но они практически не изучены.

Физически ЧР представляют собой результат релаксационных разрядных процессов в дефектах и могут быть зарегистрированы соответствующими сенсорами как функции времени в виде множества электрических, электромагнитных или акустических импульсов. На практике эта функция времени изображается в виде интегральной картины (ИК); принято ассоциировать каждый импульс лишь с фазой рабочего синусоидального напряжения, а не с «абсолютным» временем на интервале наблюдения процесса  $T$ . Информация за некоторое количество периодов накапливается в виде множества импульсов ЧР в координатах: фаза рабочего напряжения — амплитуда «кажущегося» заряда — частота повторения импульсов. Интегральная картина ЧР представляется трёхмерной (либо двумерной цветной) функцией накопленных импульсов за период наблюдения. Каждый ЧР в этой «облачной» картине обозначен пикселем, а сама ИК ЧР представляет собой результат наложения кадров за принятый период наблюдения процесса (рис. 1). Частота повторения импульсов задаётся цветом. Для наглядности наложена синусоида рабочего напряжения.

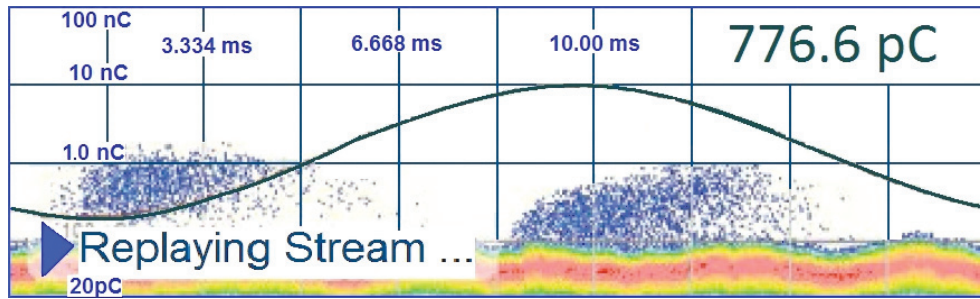


Рис. 1. Пример представления ИК ЧР из буклета прибора Омикрон MPD 600. По оси  $X$  отложено время в микросекундах  $[0 \dots 20 \text{ мс}]$ , по оси  $Y$  — кажущийся заряд в пико- и нанокюлонах  $[20 \text{ пК}, 1,0 \text{ нК}, \dots]$

Обработка данных обычно производится в следующем порядке. Задаются некоторыми классификационными признаками формы импульсов (время нарастания, время затухания, ширина импульса), далее применяются обычные методы выделения сигналов на фоне помех и обработки изображений. Так, исследуются статистические характеристики параметров импульсов. Для выделения основных свойств потока импульсов ЧР применяются традиционные методы распознавания сигналов на фоне помех: непосредственное исследование формы импульсов, распределение их по фазе рабочего напряжения, вейвлет-анализ, преобразование Фурье, нечёткая логика, метод фазового окна, идеи распознавания образов и иные известные методы в различных сочетаниях (например, [3–10]). В результате производится кластеризация сигналов и выдвигаются эвристически правдоподобные предположения относительно множества дефектов — источников ЧР.

Не имея целью подробно анализировать упомянутые работы, приходится констатировать, что применение современных математических методов анализа сигналов и изображений опирается на преимущественно эвристические и даже некорректные представления о теории множественных ЧР при неизвестном количестве дефектов. Наши исследования показывают, что в теоретической проблеме множественности ЧР и дефектов имеется существенная детерминированная составляющая и пренебрежение ею дискредитирует в своём основании любые дальнейшие статистические методы обработки информации.

Добавим, что вопрос о реальном числе дефектов в изоляции ВВО остаётся открытым, способ дифференциальной диагностики дефектов на основе ИК ЧР до сих пор не решён теоретически, не обеспечен современными методами и не упоминается в нормативных документах. Именно на эти вопросы, в конечном итоге, ориентирована данная работа.

**Диагностическая модель.** Техническая диагностика (ТД) как научное направление была сформирована в середине 1960-х гг. (в значительной степени в ИАиЭ СО АН СССР) [11] и в простейших случаях её понимают как поиск отказов в многокомпонентных системах. Методология ТД предусматривает наличие прямого и обратного алгоритмов связи между отдельным дефектом и измеряемой реакцией. Успех решения задачи диагностики зависит от разумного выбора минимального множества искомым и наблюдаемых параметров без потери смысла задачи.

Релаксационный процесс ЧР связан с первичными параметрами дефекта — размером, формой, координатами (месторасположением), электрофизическими параметрами его ближайшего окружения и внутренней среды, а также уровнем рабочего напряжения. Зная эти параметры, можно произвести анализ ЧР, т. е. рассчитать ток ЧР  $i_d(t)$ , однако решить обратную задачу определения всех этих параметров нереально даже для единственного дефекта. Задача осложняется тем, что изначально месторасположение дефектов неизвестно и доступ к ним с прямыми измерениями невозможен.

**Формализация модели.** Рассматривается элемент ВВО, содержащий в себе  $N$  дефектов. Каждый  $k$ -й дефект характеризуется вектором действительных физических параметров  $\mathbf{P}_k = (p_{k1}, \dots, p_{kn})$ , определённых на  $n$ -мерном пространстве  $\mathbf{P}$  первичных параметров. Каждый дефект генерирует на интервале наблюдения  $T_0$  релаксационную последовательность (серию) импульсов:

$$\mathbf{T}_k = (t_{1k}, \dots, t_{jk}, \dots, t_{n_k}) \quad (k = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, n_k),$$

где  $n_k$  — количество импульсов в  $k$ -м дефекте.

Если существует детерминированный алгоритм однозначного расчёта серии мгновенный  $\mathbf{T}_k$  на основе параметров дефекта  $\mathbf{P}_k$ , назовём его прямым ЧР-преобразованием PDT (Partial Discharge Transformation,  $\mathbf{T}_k = \text{PDT}(\mathbf{P}_k)$ ). Для решения обратной задачи расчёта параметров дефекта по значениям серии  $\mathbf{T}_k$  (или её отрезка длиной не менее  $n_p$ ) используем понятие обратного ЧР-преобразования  $\text{PDT}^{-1}$  [12]:

$$\mathbf{P}_k = \text{PDT}^{-1}(\mathbf{T}_k), \quad \mathbf{T}_k \in \mathbf{T}.$$

Диагностика ЧР возможна при взаимно однозначных прямом и обратном преобразованиях:

$$\mathbf{P}_k = \text{PDT}^{-1}(\text{PDT}(\mathbf{P}_k)), \quad \mathbf{P}_k \in \mathbf{P}, \quad \mathbf{T}_k \in \mathbf{T}.$$

Ток в произвольном  $k$ -м дефекте представляет собой серию одиночных быстро затухающих разрядов  $i_{0k}(t)$ , зажигающихся в мгновения  $(t_{1k}, \dots, t_{jk}, \dots, t_{n_k})$ :

$$i_k(t) = \sum_{j=1}^{n_k} i_{0k}(t - t_{jk}) \quad (k = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, n_k).$$

Обратим внимание, что число разрядов в серии  $n_k$  зависит от его параметров (от нескольких до десятков разрядов за период напряжения).

При достижении доступной измерениям точки регистрации сигналы от всех дефектов суммируются. Идеализированная ИК ЧР, рассматриваемая как функция времени кажущегося заряда  $Q_{\text{ИК}}$  на всём интервале наблюдения  $T_0$ , складывается из серий ЧР отдельных дефектов:

$$Q_{\text{ИК}} = \sum_{k=1}^N h_k(t) i_k(t), \quad N_{\text{ИК}} = \sum_{k=1}^N n_k.$$

Здесь  $h_k(t)$  — неизвестная функция передачи импульса от дефекта к точке наблюдения.

Отметим некоторые технические детали. Принято для краткости, что сигналы ЧР приходят в точку регистрации без запаздывания. Амплитуды и формы сигналов ЧР могут значительно и неопределённым образом исказиться. Эти данные существенно менее достоверны, чем  $\mathbf{T}_k$ , и в дальнейшем не используются, в то же время моменты возникновения всех ЧР могут быть достоверно измерены. Добавим здесь, что косвенно измеренный заряд ЧР официально называют «кажущимся».

Таким образом, множества  $\mathbf{T}_k$  в совокупности образуют покрытие  $\mathbf{T}_{\text{ИК}}$ :

$$\mathbf{T}_{\text{ИК}} = \sum_{k=1}^N \mathbf{T}_k.$$

Задача диагностики состоит в том, чтобы дефрагментировать ИК на составляющие, ассоциированные с отдельными дефектами, и в дальнейшем найти их параметры. Исходя из идеи минимальности количества дефектов в оборудовании, находящемся в эксплуатации (и тем самым при заданной ИК ЧР идеи максимизации опасности каждого из дефектов), с формальной точки зрения ставится задача минимального покрытия  $\mathbf{T}_{\text{ИК}}$  правильными множествами  $\mathbf{T}_k$ , однозначно соответствующими дефектам в изоляции. Длина серии ЧР некоторого дефекта при прочих равных условиях объективно определяет степень опасности данного дефекта.

**Задача покрытия.** В общей задаче покрытия [13] вводится конечное множество  $\mathbf{M}$  и семейство  $\mathbf{S}$  его подмножеств. Покрытием называют семейство множеств  $\mathbf{C} \subseteq \mathbf{S}$  наименьшей мощности, объединением которых является  $\mathbf{M}$ . В рассматриваемом случае исходными данными задачи диагностики является множество моментов зажигания ЧР  $\mathbf{M} = \mathbf{T}_{\text{ИК}}$ , а результатом диагностики — множество  $\mathbf{C} \cup \mathbf{T}_k$  и соответственно  $\mathbf{P} = \bigcup \mathbf{P}_k$ . Критерием принадлежности некоторого множества  $\mathbf{T}_x \in \mathbf{S}$  к множеству  $\mathbf{C}$  является наличие диагностических признаков, т. е. её соответствие некоторому дефекту. Далеко не всякая последовательность моментов времени  $\mathbf{T}_x = \{t_{xj}\}$ , заданная на интервале наблюдения процесса  $T_0$ , может, в принципе, соответствовать некоторому дефекту. Поэтому последовательность  $\mathbf{T}_x = \{t_{xj}\}$ , которая может соответствовать некоторому вектору  $\mathbf{P}_r \in \mathbf{P}$ , назовём правильной. ЧР-диагностика дефектов заключается в поиске правильных множеств  $\mathbf{T}_r$  среди множества ЧР  $\mathbf{T}_{\text{ИК}}$ , зарегистрированных интегральной картиной. Проверка гипотезы правильности произвольного множества моментов времени  $\mathbf{T}_x$  производится алгоритмом обратного ЧР-преобразования  $\text{PDT}^{-1}$ ; при положительном ответе вычисляются параметры дефекта  $\mathbf{P}_x$ , при отрицательном — гипотеза отвергается.

Обратим внимание, что любая правильная серия ЧР однозначно определяется  $n_p$  параметрами дефекта, в то время как она может содержать сотни импульсов за период наблюдения. Таким образом, для применения обратного ЧР-преобразования и расчёта параметров дефекта может оказаться достаточным фрагмента серии длиной  $n_p$  (или несколько большей,  $N_p > n_p$ , в зависимости от особенностей алгоритма  $\text{PDT}^{-1}$ ). Вся серия в дальнейшем восстанавливается на основе вычисленных параметров  $\mathbf{P}_k$ .

**Алгоритм решения задачи покрытия.** Для демонстрации возможности решения задачи покрытия проще всего, например, модифицировать хорошо известный «жадный» алгоритм, который основан на переборе подмножеств множества  $\mathbf{T}_{\text{ИК}}$ , начиная с максимальных, и проверке их правильности на основе обратного ЧР-преобразования. При положительном результате найденное подмножество  $\mathbf{T}_k = \{t_{jk}\}$  считается соответствующим  $k$ -му дефекту и из дальнейшего перебора предполагаемых подмножеств исключаются все  $\{t_{jk}\}$ . Формулировка «жадного» алгоритма даёт иллюстрацию принципиальной возможности решения задачи покрытия множеств. Однако, учитывая мощность множества  $\mathbf{T}_{\text{ИК}}$  (см. количество информативных пикселей на рис. 1), составляющую несколько тысяч, перебор множества его подмножеств неконструктивен. Практический алгоритм основан на переборе серий длиной не более чем  $N_p$ . Более того, для сокращения процесса удобно применить простые эвристические критерии отбраковки предполагаемых вариантов; такие критерии можно вырабатывать на основе теоретического и практического анализов процесса ЧР как простые необходимые условия правильности серии. В качестве такого критерия  $K_1$ , например, может быть предложено условие монотонности интервалов между импульсами ЧР на некоторых отрезках серии

$$(t_{k(j+1)} - t_{kj}) < (t_{k(j+1)} - t_{k(j+2)}).$$

Достаточный критерий ( $K_2$ ) определяется алгоритмом  $\text{PDT}^{-1}$ . На основе изложенного можно сформулировать практический алгоритм решения задачи покрытия.

Практический алгоритм покрытия множества  $\mathbf{T}_{\text{ИК}}$ :

1.  $\mathbf{X} \leftarrow \mathbf{T}_{\text{ИК}}$ ;  $\mathbf{C} \leftarrow \emptyset$ ;  $\mathbf{P} \leftarrow \emptyset$ ;  $k \leftarrow 0$ ;  $i \leftarrow 0$ ;
2. while  $\mathbf{X} \neq \emptyset$  do:
  - 2.1.  $i \leftarrow i + 1$  очередной выбор в лексикографическом порядке;
  - 2.2. выбираем  $\mathbf{T}_{fi} = \{t_{ir}\} \in \mathbf{X}$ ,  $\text{size}(\mathbf{T}_{fi}) = N_p$ ;
  - 2.3. проверяем соответствие критерию  $K_1$ ;
  - 2.4. если нет, то go to 2.1;
  - 2.5. проверяем соответствие критерию  $K_2$ ;
  - 2.6. если нет, то go to 2.1;
  - 2.7.  $k \leftarrow k + 1$ ;  $\mathbf{P}_k = \text{PDT}^{-1}(\mathbf{T}_{fi})$ ;  $\mathbf{X} \leftarrow \mathbf{X} \setminus \{t_{ir}\}$ ;  $\mathbf{T}_k = \text{PDT}(\mathbf{P}_k)$ ;
  - 2.8.  $\mathbf{C} \leftarrow \mathbf{C} \cup \mathbf{T}_k$ ;  $N \leftarrow |\mathbf{C}|$ ;  $\mathbf{P} \leftarrow \mathbf{P} \cup \mathbf{P}_k$ ;
  - 2.9. return  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{C}$ .

**Простая физическая модель дефекта.** В качестве простейшей модели дефекта, ассоциированного с релаксационным процессом ЧР, рассматривается инородное включение в изоляции в виде малой сферы (обычно — газовый пузырёк в трансформаторном масле), находящейся под действием переменного электрического поля. Эта модель подробно формализована [14–16]. Показано, что дефект описывается четырьмя (с точностью до произвольного множителя) параметрами: амплитудой принуждённого напряжения на дефекте  $U_{mk}$ , напряжениями зажигания (з)  $U_{zk}$  и погасания (п)  $U_{pk}$  ЧР и начальным напряжением на дефекте  $U_{0k}$  (параметры безразмерны, если принять  $U_{zk} = 1$ ):

$$\mathbf{P}_k(p_1, \dots, p_4) = \mathbf{U}_k = \mathbf{U}_k(U_{mk}, U_{zk}, U_{pk}, U_{0k}), \quad \mathbf{T}_k = \text{PDT}(\mathbf{U}_k).$$

Эти параметры характеризуют его индивидуальные электрические свойства и интегрируют в себе первичные электрофизические параметры (местоположение, диэлектрические свойства внешности и внутренности дефекта). Обратное ЧР-преобразование для этой модели дефекта легко реализуется аналитически.

**Пример.** Обратимся к примеру компьютерного моделирования ИК ЧР и дальнейшей её дефрагментации. Математическое моделирование ИК ЧР производилось на основе модели ЧР [14] с дискретностью  $10^4$  точек на период. Пусть за период рабочего напряжения  $T_0$  зарегистрировано 29 импульсов ЧР, возникших в нескольких дефектах. Перечислим моменты ЧР ИК (номера соответствующих расчётных точек):  $\mathbf{T}_{\text{ИК}} = \{160, 235, 509, 564, 624, 719, 887, 921, 1136, 1255, 1333, 1342, 1890, 1978, 2033, 2197, 5299, 5414, 5632, 5782, 5953, 5998, 6061, 6203, 6441, 6577, 6750, 6783, 7240\}$  (на рис. 2 они в отличие от рис. 1 изображены в виде идеализированных импульсов).

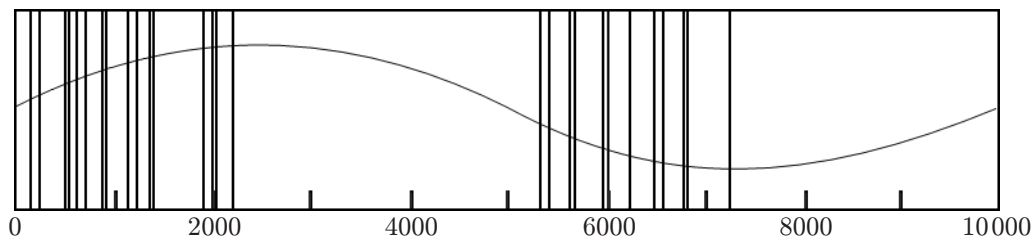


Рис. 2. Иллюстрация расчётной ИК ЧР (на периоде рабочего напряжения  $10^4$  точек на период). По оси  $X$  расположены номера расчётных точек на периоде рабочего напряжения, по оси  $Y$  — величина импульса, принятая равной 1

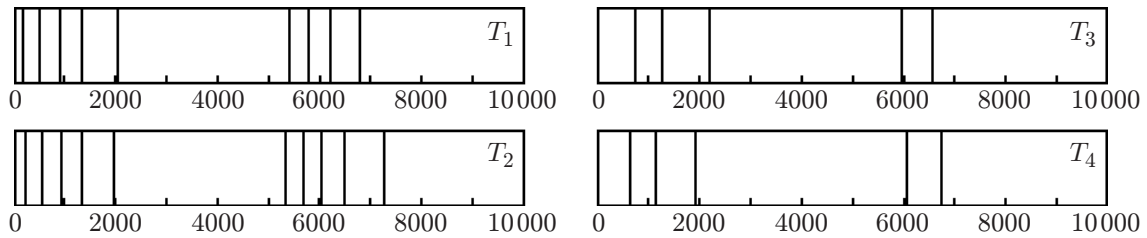


Рис. 3. Дефрагментация ИК ЧР по рис. 2 на 4 серии ЧР

В соответствии с положениями модели для снижения погрешностей вычислений в примере будем считать  $N_p = 4$ , используя для дополнительного контроля значение  $U_3 = 1$ . Зададим область определения параметров в виде

$$\mathbf{U} = (U_m, U_3, U_{\text{п}}, U_0) \in ([1,05, 1,60], 1, [0,5, 0,8], [0, 1]).$$

Для первой итерации выберем  $\mathbf{T}_{1x} = \{t_1, t_2, t_3, t_4\} = \{160, 235, 509, 564\}$ . Как видно, эта четвёрка мгновений ЧР не удовлетворяет критерию  $K_1: (t_2 - t_1) > (t_4 - t_3)$ . Следующая итерация  $\mathbf{T}_{1x} = \{t_1, t_2, t_3, t_5\} = \{160, 235, 509, 624\}$  удовлетворяет критерию  $K_1$ , однако расчёты показывают, что формально вычисленные параметры не удовлетворяют критерию  $K_2: \mathbf{U}_{2x} \notin \mathbf{U}$ . Продолжая перебор вариантов, получим первую четвёрку мгновений импульсов, удовлетворяющую обоим критериям:  $\mathbf{T}_{1(4)} = \{160, 509, 887, 1333\}$ , причём формально вычисленный вектор параметров, идентифицирующий первый дефект, имеет значение

$$\mathbf{U}_1 = (U_{1m}, U_{13}, U_{1\text{п}}, U_{10}) = (1,4, 1, 0,75, 0,86) \in \mathbf{U}.$$

Теперь можно рассчитать мгновения ЧР всей серии, ассоциированной с первым дефектом и содержащейся в  $\mathbf{T}_{\text{ИК}}$ :

$$\mathbf{T}_1 = \{160, 509, 887, 1333, 2033, 5414, 5782, 6203, 6783\}.$$

Дальнейший итерационный процесс приводит к полному покрытию  $\mathbf{T}_{\text{ИК}}$ :

$$\mathbf{T}_2 = \{235, 564, 921, 1342, 1978, 5299, 5632, 5998, 6441, 7240\};$$

$$\mathbf{T}_3 = \{719, 1255, 2197, 5953, 6577\}, \quad \mathbf{T}_4 = \{624, 1136, 1890, 6061, 6750\}.$$

Как результат декомпозиции ИК мы имеем 4 серии ЧР, покрывающие ИК и ассоциированные с различными дефектами (рис. 3).

Длины покрывающих фрагментов ИК относятся как  $N_1 : N_2 : N_3 : N_4 : N_5 = 9 : 10 : 5 : 5 : 4$ . Степени опасности дефектов энергетически соотносятся как квадраты количества импульсов токов ЧР, т. е.  $81 : 100 : 25 : 25 : 16$ .

**Заключение.** Диагностика ЧР в элементах ВВО в условиях эксплуатации предстаёт как высоковольтный электрофизический эксперимент, в котором регистрируется ИК импульсов ЧР, происшедших на множестве моментов времени  $\mathbf{T}_{\text{ИК}}$ , причём ИК формируется всеми дефектами — источниками ЧР.

Показано, что дифференциальная диагностика дефектов может быть формально сведена к задаче покрытия множества  $\mathbf{T}_{\text{ИК}}$ .

Построена диагностическая модель дефекта, использующая множество его электрофизических параметров  $\mathbf{P}_k$  и множество мгновений импульсов  $\mathbf{T}_k \in \mathbf{T}_{\text{ИК}}$ , порождённых этим

дефектом, между которыми существует взаимно однозначная детерминированная связь. Эта связь формализуется алгоритмами прямого и обратного ЧР-преобразований (PDT и  $PDT^{-1}$  соответственно).

Предложен практический алгоритм решения задачи покрытия множества  $\mathbf{T}_{ИК}$ , основанный на постулате, что не всякое  $\mathbf{T}_x \in \mathbf{T}_{ИК}$  может быть ассоциировано с реальным дефектом. Приведён иллюстративный пример.

Представляется, что цифровая обработка больших данных мониторинга ЧР в элементах ВВО в рабочих режимах должна в первую очередь опираться на рассмотренную модель как отражение структуры массива экспериментальных данных и затем — на привлечение статистических методов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000)**. Национальный стандарт РФ. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. М.: Стандартинформ, 2014. 47 с.
2. **International IEC Standard 60270 – 2000**. High-voltage test techniques — Partial discharge measurements. British Standard. High-voltage test techniques — Partial discharge measurements BS EN 60270:2001 (IEC 60270:2000).
3. **Ma H., Chan J. C., Saha T. K., Ekanayake C.** Pattern recognition techniques and their applications for automatic classification of artificial partial discharge sources // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2013. **20**, Iss. 2. P. 468–478.
4. **Judd M. D., Yang L., Hunter I. B.** Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Part I: Sensors and signal interpretation // *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2005. **21**, Iss. 2. P. 5–14.
5. **Markalous S., Tenbohlen S., Feser K.** Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2008. **15**, Iss. 6. P. 1576–1583.
6. **Lai K., Phung B., Blackburn T., Muhamad N.** Classification of partial discharge using PCA and SOM // *Proc. of the Intern. Power Eng. Conference (IPEC)*. Singapore, 3–6 Dec., 2007. P. 1311–1316.
7. **Lin Y. H.** Using K-means clustering and parameter weighting for partial-discharge noise suppression // *IEEE Trans. Power Del.* 2011. **26**, Iss. 4. P. 2380–2390.
8. **Si W., Li J., Yuan P., Li Y.** Digital detection, grouping and classification of partial discharge signals at DC voltage // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2008. **15**, N 6. P. 1663–1674.
9. **Liao R., Yang L., Li J., Grzybowski S.** Aging condition assessment of transformer oil-paper insulation model based on partial discharge analysis // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2011. **18**, Iss. 1. P. 303–311.
10. **Peng X., Zhou C., Hepburn D. M. et al.** Application of K-Means method to pattern recognition in on-line cable partial discharge monitoring // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2013. **20**, Iss. 3. P. 754–761.
11. **Верзаков Г. Ф., Киншт Н. В., Рабинович В. И., Тимонен Л. С.** Введение в техническую диагностику. М.: Энергия, 1968. 224 с.
12. **Kinsht N. V., Petrunko N. N.** Multiple partial discharges and set of their sources // *Proc. of the 10th Intern. Scientific Symposium on Electrical Power Engineering*. Stará Lesná, Slovakia, 16–18 Sept., 2019. P. 178–182.
13. **Еремеев А. В., Заозерская Л. А., Колоколов А. А.** Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования // *Дискретный анализ и исследование операций*. 2000. **7**, № 2. С. 22–46.

14. **Kinsht N. V., Petrunko N. N.** Some possibility of constructing of the pd processes quasi-deterministic model // Proc. of the Intern. Conference «Condition Monitoring and Diagnosis 2014» (CMD 2014). Jeju, Korea, 21–25 Sept., 2014. P. 371–374.
15. **Киншт Н. В., Петрунько Н. Н.** Закономерности формирования интегральной картины частичных разрядов как множества квазидетерминированных процессов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 4. С. 14–20.
16. **Киншт Н. В., Петрунько Н. Н.** Об оценке параметров частичных разрядов // Электричество. 2016. № 7. С. 51–56.

*Поступила в редакцию 19.08.2020*

*После доработки 23.01.2021*

*Принята к публикации 01.03.2021*

---