



УДК 621.31+681.5

© 2020 г. **Н.В. Киншт**, д-р техн. наук,

Н.Н. Петрунько, канд. техн. наук

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ ИЗОЛЯЦИИ И ЗАДАЧА О ПОКРЫТИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ КАРТИНЫ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Рассматриваются вопросы диагностики дефектов изоляции элементов высоковольтного электрооборудования (ВВО) на основе интерпретации интегральной картины частичных разрядов (ЧР). В качестве математического аппарата привлекается идея задачи о покрытии – декомпозиции множества моментов, зарегистрированных ЧР на подмножества, ассоциирующиеся с отдельными дефектами.

Ключевые слова: высоковольтное оборудование, частичные разряды, диагностика, математическое моделирование, задача о покрытии.

DOI: 10.22250/isu.2020.64.91-102

Введение

В управлении эксплуатацией ответственного электроэнергетического оборудования особую роль представляет ранняя диагностика оборудования в процессе эксплуатации под рабочим напряжением, без отключений оборудования. Техническое состояние (ТС) элементов ВВО в наибольшей степени определяется состоянием его изоляции, связанной с наличием, интенсивностью и распределением частичных электрических разрядов, возникающих как при нормальной работе ВВО, так и при деградации изоляции и других конструктивных элементов. Источниками ЧР являются (потенциальные) дефекты. Такими являются неоднородные включения в изоляции (например, газовые). В результате накапливания действия разрядных процессов потенциальные дефекты могут превратиться в реальные дефекты, препятствующие дальнейшей работе оборудования, или даже приводить к серьезным авариям.

Дефекты располагаются в глубине изоляции, и в руководящих документах [1 – 3] декларируется невозможность непосредственного определения истинного заряда ЧР. Заряд ЧР рассчитывается на основе косвенных измерений; его значение называют «кажущимся». Измерение истинного заряда ЧР, происходящего в глубине изоляции действующего оборудования, невозможно, а регистрируемый «кажущийся» заряд является весьма грубой оценкой. Процесс ЧР представляет собой релаксационный процесс заряда изоляции и разряда в дефекте, так что источник ЧР может генерировать серию ЧР в течение одного периода рабочего напряжения. Когда (потенциальных) дефектов как источников ЧР несколько (или много) и их месторасположения различны, множество источников генерирует множество серий ЧР.

Регистрируемая интегральная картина (ИК) ЧР оказывается достаточно сложной. Ее изображение обычно приводится к периоду рабочего напряжения и представляется преимущественно двухмерной цветной (либо трехмерной черно-белой) функцией множества импульсов ЧР в координатах фаза напряжения (время) – кажущийся заряд – частота повторения импульсов (рис. 1).

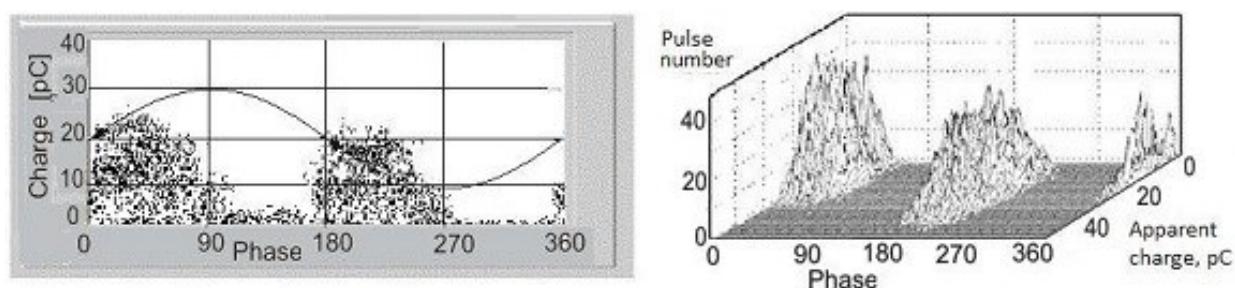


Рис. 1. Примеры функции множества импульсов ЧР.

Однако вопрос о реальном числе дефектов в изоляции ВВО и способе их дифференциальной диагностики на основе интегральной картины ЧР до сих пор не решен, не обеспечен современными методами и не упоминается в нормативных документах. Именно этот вопрос является предметом анализа настоящей работы.

Диагностика ЧР и задача о покрытии

Техническая диагностика в качестве научного направления возникла в 1970-х гг. как ответ на необходимость научно обоснованной эксплуатации все усложняющихся технических систем, которую в простейших случаях понимают как поиск отказов в многокомпонентных системах [4]. При этом оказалось необходимым формализовать перечень (всех) возможных дефектов, формализовать перечень возможных диагностических воздействий и множества наблюдаемых реакций системы. Далее следовало эксперимен-

тальным либо расчетным путем обеспечить информацию о поведении системы при наличии любого из дефектов, т.е. составить множество троек (дефект, воздействие, реакция). Наконец, требовалось составить нетривиальную научно обоснованную программу диагностики, обладающую минимальной (или близкой к минимальной) трудоемкостью. Последняя задача известна как задача построения (минимизации) тестов и получила широкое распространение в компьютерных и других системах. Опираясь на достижения теории дискретной оптимизации, в конечном итоге она сводится к задаче об (оптимальном) покрытии некоторого множества [5]. Однако содержательное наполнение различных задач диагностики определяется, с одной стороны, физическими и структурными особенностями рассматриваемого объекта диагностирования, а, с другой стороны, – математическими моделями дефектов, воздействий и наблюдаемых реакций.

Моделей диагностики дефектов изоляции высоковольтного электроэнергетического оборудования, ассоциированных с регистрацией и обработкой информации о частичных разрядах, формализованных в виде стандартной задачи диагностики или математической задачи о покрытии, до сих пор исследователями представлено не было.

Абстрактная задача о покрытии, пригодная для использования в нашем случае, может быть сформулирована следующим образом. Исходными данными задачи о покрытии множества является конечное множество M и семейство S его подмножеств. Покрытием называют семейство $C \subseteq S$ наименьшей мощности, объединением которых является M . Задача о покрытии послужила основой для математической интерпретации большого количества задач технической диагностики в различных вариациях их постановки. (Наиболее ранней из них является задача о построении диагностических тестов).

Содержательным контекстом задачи является процесс эксплуатации высоковольтного оборудования, в изоляции которого возможно несчетное множество (потенциальных) дефектов M_d . На практике в некоторый момент мониторинга ИК ЧР можно говорить о конечном множестве потенциальных дефектов $M_{дик} = \{d_k\}$, ($k = 1, \dots, N$), количество которых N_d неизвестно. Каждый k -й дефект изоляции под воздействием рабочего напряжения является источником (генератором) некоторой серии частичных разрядов с кажущейся амплитудой заряда A_k и множеством моментов времени отдельных импульсов ЧР T_k . Множество сигналов всех ЧР в своей совокупности $N_{ик}$, регистрируемых с помощью технических средств, составляет интегральную картину ЧР. Измерения мгновений отдельных импульсов ЧР могут произво-

даться с высокой точностью, а амплитуды кажущихся зарядов имеют значительную степень неопределенности, поэтому при дальнейшем анализе проблемы будем опираться лишь на информацию о мгновениях импульсов ЧР.

В настоящем контексте в качестве конечного множества M выступает множество мгновений, зарегистрированных ЧР, где $T_{ик} = \{t_i\}$, ($i = 1, \dots, N_{ик}$) – множество моментов времени импульсов ЧР; $N_{ик}$ – количество ЧР, составляющих ИК ЧР.

Далее введем в рассмотрение следующие обозначения: $T = \{T_j\}$ – множество всех подмножеств $T_{ик}$; $T_{п} \subseteq T$ – множество подмножеств $T_{ик}$, каждое из которых может быть (в принципе) ассоциировано с некоторым потенциальным дефектом; $C \subseteq T_{п}$ – множество подмножеств T , однозначно ассоциированное с множеством дефектов $M_{дик}$, отражающихся ИК ЧР (рис. 2); $T_k = \{t_{kj}\} \subset C$, ($j = 1, \dots, N_k$) – множество моментов времени серии ЧР k -го дефекта $T_{ик} = \cup T_k$; N_k – количество ЧР в k -й серии.

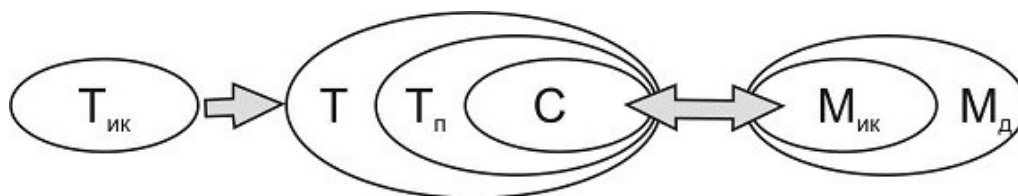


Рис. 2. Условное представление решения задачи о покрытии ИК ЧР.

На содержательном уровне постановка и решение задачи о покрытии ИК ЧР означает ее декомпозицию на подмножества, однозначно соответствующие наиболее значимым дефектам в изоляции. В рамках данной работы опасность дефекта определяется количеством импульсов ЧР, т.е. длиной в нем серии ЧР.

Ясно, что если число зарегистрированных ЧР составляет хотя бы 10^3 , мощность множества T есть 2^{1000} , а реальное количество значимых потенциальных дефектов, например, не более 10, то перебор такого множества вариантов для определения перечня дефектов превосходит все разумные пределы. Здесь встает задача построения практически приемлемого научно обоснованного алгоритма перебора. Впрочем, такой конфликт между множеством потенциальных теоретических возможностей и реальным конечным множеством ответов задачи в теории технической диагностики не нов, и опыт показывает, что сокращение перебора до разумных объемов возможно.

Для практического использования этого формального описания необходимо поставить и сформулировать несколько подзадач. Первая – обеспечить описание различных дефектов по их реальным электрофизическим параметрам, т.е. построить математическую модель индивидуального дефек-

та и обеспечить возможность рассмотрения их множества. Здесь приходится согласовывать приемлемый достаточный уровень глубины диагностики с реальными надеждами решить задачу диагностики названных параметров дефекта. Далее стоит важнейшая специфическая задача формализовать связь между дефектом (точнее – между его электро-физическими параметрами) и подмножеством генерируемых им ЧР, т.е. построить электрофизическую модель процесса ЧР в дефекте и выработать критерий соответствия между параметрами произвольного k -го дефекта и множеством (серией) генерируемых им ЧР $T_k \subseteq C$. При этом в качестве дополнительных данных могут быть привлечены параметры рассматриваемого элемента оборудования и режимов его работы. Третьей подзадачей оказывается собственно решение задачи о покрытии, т.е. построение специального алгоритма, выбор или модификация такого алгоритма решения среди аналогов, предлагаемых в научной литературе.

Модель дефекта и закономерности процесса ЧР

ЧР возникают в дефектах изоляции (малоразмерных включениях), диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность которых отличны от характеристик основной изоляции. В каждом из элементарных включений под действием рабочего напряжения происходит релаксационный процесс быстрого разряда ЧР и последующего медленного его заряда.

В основу модели дефекта, порождающего ЧР, в достаточно общем виде можно взять следующие положения. Предполагается, что если заданы характерные размер дефекта и его форма, его пространственное расположение, конфигурация рабочего электрического поля, изменяющегося по синусоидальному закону, диэлектрические проницаемости изоляции и внутренности дефекта, пробивная напряженность поля и напряженность погасания разряда, то теоретически можно рассчитать процесс ЧР как переходной релаксационный процесс. При этом принимаются во внимание постоянные времени разряда и заряда ЧР, также могут понадобиться другие параметры, отражающие режим работы изоляции.

На перечисленных принципах была корректно сформулирована модель [6], индивидуализирующая некоторый k -й дефект вектором в 4-мерном пространстве параметров $(U_{mk}, U_{zk}, U_{pk}, U_{ok})$, где обозначены: U_{mk} – амплитуда принужденного напряжения на дефекте; U_{zk}, U_{pk} – напряжения зажигания и погасания соответственно; U_{ok} – начальное условие процесса.

В первых трех параметрах опосредованно проявляют себя размер включения и его форма, геометрические координаты, структура рабочего

поля в заданной точке активной области высоковольтного устройства, диэлектрические свойства основной изоляции и включения, поляризационные параметры изоляции, а также свойства вольтамперной характеристики частичного разряда. Начальное условие U_{0k} является величиной случайной и лежит в пределах: $U_{zk} > U_{0k} > -U_{zk}$. Есть еще некоторые моменты, требующие упоминания. Во-первых, абсолютные величины указанных параметров связаны с истинным зарядом дефекта, который не может быть непосредственно измерен [7]; аналитические же свойства процесса ЧР вполне описываются вектором относительных значений $\mathbf{U}_k^* = (U_{mk}^*, U_{nk}^*, U_{0k}^*)$, если за базис взято напряжение зажигания $U_{zk}^* = 1$. (Дальше, для краткости верхний индекс * будем опускать). Во-вторых, в излагаемой простейшей модели постоянная времени разряда ЧР $\tau_{чр}$ полагается существенно меньше, а постоянная времени его заряда τ_3 – существенно больше периода рабочего напряжения.

Проиллюстрируем кратко процесс возникновения ЧР в дефекте на одном периоде рабочего напряжения (опустив индекс k – номер дефекта (рис. 3)).

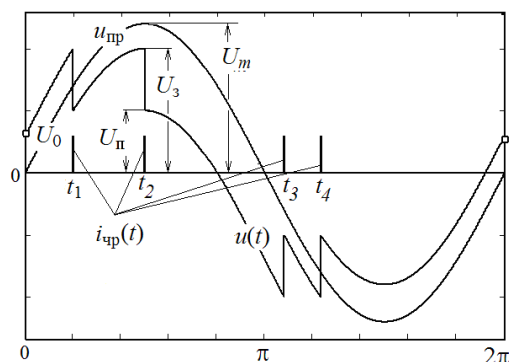


Рис. 3. Иллюстрация релаксационного процесса ЧР на периоде рабочего напряжения.

Напряжение на дефекте $u(t)$ возрастает под воздействием принужденного напряжения $u_{чр}(t)$ с величины начального значения U_0 до напряжения зажигания U_3 , когда происходит ЧР, поскольку $\omega\tau_{чр} \ll 2\pi$, ток единичного ЧР, представляет собой идеализированный импульс величиной I_m . По окончании разряда релаксационный процесс заряда включения продолжается и по достижении $u(t)$ величины U_3 происходит следующий ЧР. Таким образом, ток ЧР представляет собой серию (последовательность) импульсов в моменты времени (t_1, t_2, t_3, \dots) . Периодичность процесса в общем случае не гарантируется. Явных закономерностей последовательности моментов времени (t_1, t_2, \dots) не наблюдается. Очевидно, что в рамках сформулированных ограничений множество параметров $\mathbf{U}_k = (U_{mk}, U_{nk}, U_{0k})$ однозначно определяет множество моментов времени (t_{1k}, t_{2k}, \dots) . В [8] такой процесс ЧР в дефекте назван квазидетерминированным, там же приведены соответствующие аналитиче-

ские соотношения.

Поскольку, как констатируется в ГОСТах [1 – 3], непосредственное измерение тока ЧР в дефекте невозможно, то измерение истинной амплитуды импульсов ЧР I_m проблематично. В то же время технические возможности позволяют без проблем измерять моменты времени серии ЧР $\mathbf{T} = (t_1, t_2, \dots)$, в том числе соотносить их с фазой рабочего напряжения. В этом смысле последовательность \mathbf{T} представляет собой надежную информацию о процессе ЧР в единичном дефекте; она единственным образом связана с вектором энергетических параметров \mathbf{U} .

Проиллюстрируем влияние вариации параметров дефекта на вид серии ЧР по результатам численного эксперимента (рис.4). Моделирование производилось с точностью 10^4 точек на период рабочего напряжения. Ясно, что увеличение U_m приводит к увеличению ЧР (рис. 4а), аналогично увеличение напряжения погасания U_n (поляризационной составляющей тангенса угла потерь в изоляции) также увеличивает количество ЧР в серии (рис.4б), а вариация начальных условий U_0 приводит к нелинейному сдвигу серии и, быть может, к «потере» некоторых импульсов ЧР (рис. 4в).

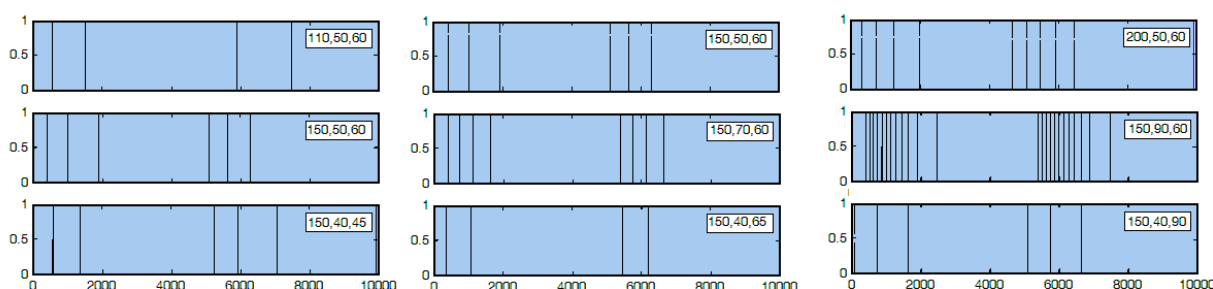


Рис. 4. Вариация \mathbf{U} -параметров дефекта (слева направо):
а) увеличение U_m ; б) увеличение U_n ; в) изменение U_0 .

Таким образом, выявлена явная связь между индивидуальными параметрами некоторого дефекта и наблюдаемыми (измеряемыми) параметрами соответствующей серии ЧР. Эта связь взаимно однозначна. Можно показать, что не всякой последовательности импульсов $\mathbf{T}_x = (t_{1x}, t_{2x}, \dots)$ может соответствовать тройка реальных параметров дефекта; иначе говоря, не всякая последовательность \mathbf{T}_x является «правильной» для рассматриваемой задачи.

Идеализированная интегральная картина ЧР является суперпозицией правильных серий ЧР, генерируемых всеми дефектами одновременно (рис. 5а). Задача диагностики состоит в том, чтобы дефрагментировать ИК на составляющие, ассоциированные с отдельными дефектами (рис. 5б) и в дальнейшем найти их параметры.

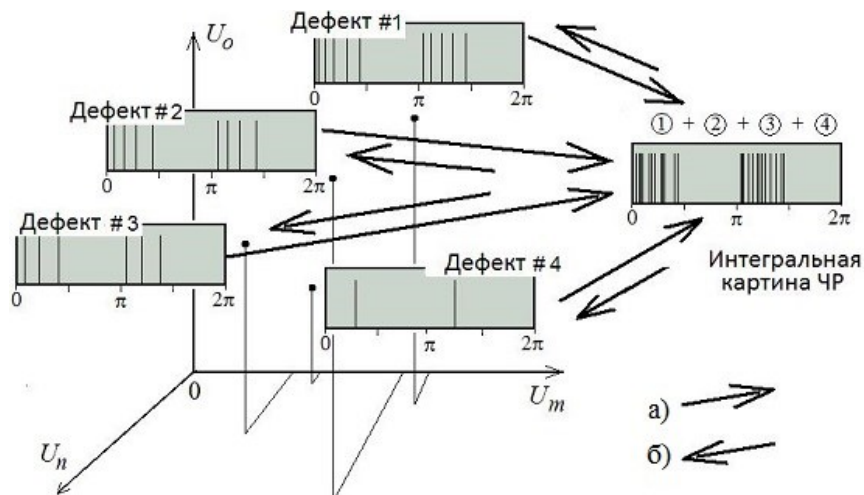


Рис. 5. Формирование ИК ЧР – (а) и задача ее дефрагментации – (б).

Формализация задачи о покрытии

Рассмотрим более подробно задачу о покрытии как задачу дефрагментации ИК. Обратим внимание, что множество T_n может быть задано как явным образом в виде таблицы дефектов, так и в виде специального алгоритма проверки произвольного множества $T_x = (t_{1x}, t_{2x}, \dots)$ на его принадлежность этому множеству.

Стоит задача покрытия (декомпозиции) множества $N_{ик}$ импульсов N фрагментами – последовательностями $T_k = (t_{1k}, t_{2k}, \dots)$, ассоциированными с отдельными дефектами. При этом в качестве основного ограничения – требование, чтобы эти последовательности были правильными. Другими словами, в 3-мерном пространстве $U = (U_m, U_n, U_0)$ необходимо найти точки $U_k = (U_{mk}, U_{nk}, U_{0k})$, порождающие последовательности T_k .

Для простоты в данном контексте пространство U можно считать дискретным с точностью, удовлетворяющей практическим нуждам. Так, например, вполне можно ограничиться 100 точками значений по каждой координате, и пространство U будет состоять всего лишь из 10^6 точек. В этом виде оно представляет собой перечень потенциальных дефектов, а вместе с множеством T_n является аналогом таблицы неисправностей, употребляемой в общей теории технической диагностики [4].

Для решения задачи о покрытии проще всего, например, модифицировать хорошо известный «жадный» алгоритм [9]:

1. $X \leftarrow T_{ик}$
2. $C \leftarrow \emptyset$
3. $U \leftarrow \emptyset$
4. $k := 0$
5. *while* $X \neq \emptyset$ *do*

- 5.1. выбираем $T_j \in X$ с наибольшим $|X \cap T_j|$
- 5.2. $X \leftarrow X, T_j$
- 5.3. проверяем $T_j \setminus T_n = \emptyset$?
- 5.4. если да, то *go to* 5.1
- 5.5. $k := k + 1$
- 5.6. $T_k \leftarrow T_j$
- 5.7. $C \leftarrow C \cup T_k$
- 5.8. $U_k \leftarrow (U_{mj}, U_{nj}, U_{oj})$,
- 5.9. $U \leftarrow U \cup U_k$
6. $N \leftarrow |C|$
7. *return* C, U

Множество C представляет собой совокупность дефрагментированных правильных фрагментов ИК ЧР.

«Жадный» алгоритм основан на переборе подмножеств множества $T_{ик}$ (он, в принципе, использован в патенте [10]). Можно предложить другие, более экономные алгоритмы, однако этот вопрос требует специального исследования. В приводимом далее примере в основу алгоритма покрытия положим перебор множества T_n .

Пример

Обратимся к примеру компьютерного моделирования ИК ЧР и дальнейшей ее дефрагментации [11, 12]. Пусть за период рабочего напряжения зарегистрированы 28 импульсов ЧР, вызванных несколькими дефектами. Математическое моделирование данной ИК ЧР производилось на основе квазидетерминированной модели ЧР с дискретностью 10^4 точек на период.

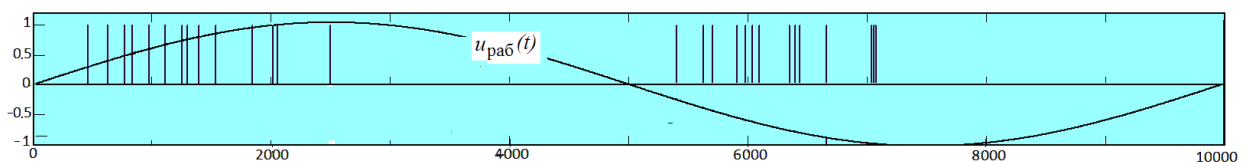


Рис. 6. Иллюстрация расчетной ИК ЧР (на периоде рабочего напряжения).

Перечислим импульсы ИК (моменты времени импульсов идентифицируются с номерами соответствующих расчетных точек):

$T_{ик} = \{462, 629, 769, 834, 979, 1112, 1253, 1297, 1397, 1535, 1846, 2019, 2058, 2500, 5403, 5629, 5705, 5912, 5979, 6039, 6098, 6350, 6397, 6439, 6660, 7039, 7058, 7074\}$.

Для создания базы данных «правильных» серий ЧР были предварительно промоделированы варианты T_n для ряда совокупностей численных значений U , а именно:

$U_m = (1.1: 0.1: 2.0)$, $U_3 = 1$, $U_n = (0.1: 0.05: 0.9)$; $U_0 = (0.1: 0.1: 0.9)$,
итого $20 \times 17 \times 9 = 3060$ вариантов.

Поскольку общее количество точек ЧР в данной интегральной картине 28, то общее количество их подмножеств составляет $2^{28} = 268435456$, их перечисление уже является проблемой. В данном случае было принято решение искать покрытие ИК ЧР на основе множества ЧР на первом полупериоде рабочего напряжения, т.е. среди $2^{14} = 16384$ вариантов, а остальные точки использовать как контрольные.

После осуществления перебора вариантов как результат декомпозиции ИК получаем 4 серии ЧР T_k , ($k = 1, 2, 3, 4$) покрывающие ИК и ассоциированные с различными дефектами (рис. 7); при этом параметры этих дефектов $U_k = (U_{mk}, U_{nk}, U_{ok})$ также выявляются в процессе поиска (таблица).

k	$C = U T_k$	n_k	U_k
1	1297, 2019, 6098, 6660	4	(1.1, 0.75, 0.2)
2	834, 1253, 1846, 5912, 6350, 7039	6	(1.2, 0.75, 0.4)
3	629, 979, 1397, 2058, 5629, 5979, 6397, 7058	8	(1.3, 0.75, 0.5)
4	462, 769, 1112, 1535, 2500, 5403, 5705, 6039, 6439, 7074	10	(1.4, 0.75, 0.6)

В графическом виде полученные фрагменты представлены на рис. 7.

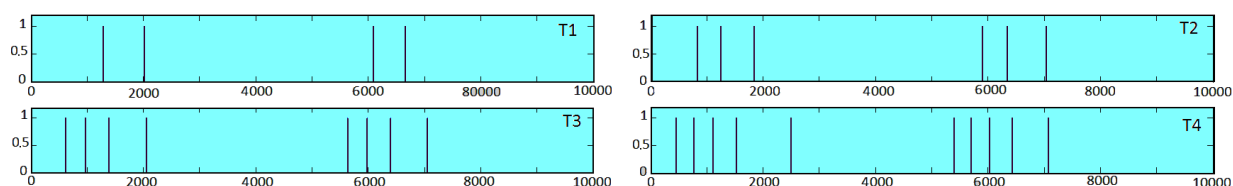


Рис. 7. Дефрагментация ИК ЧР на 4 серии ЧР.

Длины покрывающих фрагментов ИК относятся как:

$$n_1: n_2: n_3: n_4 = 4: 6: 8: 10;$$

они пропорциональны средним токам ЧР в соответствующих дефектах. Для оценки энергетической опасности каждого из дефектов требуется квадратичная мера, и сравнительная относительная опасность S_k каждого из дефектов определится соотношением:

$$S_1: S_2: S_3: S_4 = n_1^2: n_2^2: n_3^2: n_4^2 = 16: 36: 64: 100.$$

Обратим внимание, что суммарный (по всем дефектам) ток ЧР определяется 28 единичными импульсами ЧР; оценка опасности ЧР по данным ИК в целом была бы порядка $28^2 = 784$. Однако эта оценка необоснованно завышена. Фактически суммарная деструктивная энергия ЧР оказывается существенно ниже, причем она распределена в активном объеме по четырем потенциальным дефектам, и максимальную опасность представляет 4-й потенциальный дефект с опасностью, равной 100.

Заключение

Интегральная картина ЧР сама по себе не дает ответа на вопрос: сколько реальных дефектов создают данную картину и какова опасность каждого из них? Современные методики также не решают этого важного вопроса. Принцип дефрагментации этой ИК на «правильные» фрагменты, ассоциированные с отдельными дефектами, может быть формализован с помощью математической задачи о покрытии множества. Для реализации этой задачи необходима разработка модели дефекта, формирующей соответствующие содержательные электрофизические ограничения на «правильные» фрагменты. Дальнейшая проработка теории ЧР в данном направлении представляется перспективной.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) Национальный стандарт РФ. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. – М.: Стандартинформ, 2014.
2. International IEC Standard 60270 – 2000. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements.
3. British Standard. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements BS EN 60270:2001 (IEC 60270:2000).
4. *Верзаков Г.Ф., Киншт Н.В., Рабинович В.И., Л.С. Тимонен.* Введение в техническую диагностику. – М.: Энергоиздат, 1967.
5. *Еремеев А.В., Заозерская Л.А., Колоколов А.А.* Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования // Дискретный анализ и исследование операций. – 2000. – Т. 7, № 2. – С.22-46.
6. *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.
7. *Киншт Н.В., Петрунько Н.Н.* Об оценке параметров частичных разрядов // Электричество. – 2016. – №7. – С.51-56.
8. *Kinsht N.V., Petrunko N.N.* Some Possibility of Constructing of the PD Processes Quasi-Deterministic Model // Proc. of the 2014 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2014 (CMD2014). – Jeju, Korea, 2014. – P.371-374.
9. *Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч., Ривест Р.* Алгоритмы: построение и анализ. – М.: Московский центр непрерывного математического образования, 2001. (Гл. 16. Жадные алгоритмы). – С.889-892.
10. *Пат. 2604578 РФ.* Способ контроля технического состояния элементов высоковольтного оборудования / Н.В. Киншт, Н.Н. Петрунько // Официальный бюл. «Изобретения. Полезные модели». – 2016. – №34.
11. *Nikolay V. Kinsht, Natalia N. Petrunko.* Regularities of the Formation an Integrated Partial Discharges Picture as a set of Quasideterministic Processes // Proc. of the 8th International

Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2015. - Stará Lesná, Slovakia, 2015. – P.315-318.

12. *Кинит Н.В., Борисов Б.Д., Петрунько Н.Н.* Вопросы оценки множественных частичных разрядов в высоковольтном оборудовании // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – №2(53). – С.108-112.

E-mail:

Кинит Николай Владимирович - kin@dvo.ru;

Петрунько Наталья Николаевна - pnn@dvo.ru.