

Н.В. КИНСИТ, Н.Н. ПЕТРУНЬКО

## Структура и свойства диагностической модели дефектов изоляции электрооборудования

*Рассматриваются методические вопросы построения диагностической модели дефекта изоляции элемента высоковольтного оборудования как источника частичных разрядов (ЧР). Дается классификация первичных электрофизических параметров, определяющих процесс ЧР. Вводится понятие вторичных параметров процесса. Формализуется взаимосвязь параметров модели дефекта и измеренных параметров. Постулируется необходимость использования пары специальных алгоритмов (названных прямым и обратным ЧР-преобразованиями), решающих взаимно обратные задачи – анализа процесса ЧР и диагностики параметров модели дефекта. В качестве примера приводится квазидетерминированная модель дефекта, позволяющая выявлять специальные свойства серий ЧР, полезные при анализе ЧР на фоне шумов, а также при дифференциальной диагностике дефектов.*

*Ключевые слова:* математическая модель, дефект изоляции, частичные разряды.

**Structure and properties of the diagnostic model of electrical equipment insulation defects.** N.V. KINSHT, N.N. PETRUNKO (Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok).

*Methodological issues of constructing a diagnostic model of the insulation defect of a high-voltage equipment element as a source of partial discharges (PD) are considered. A classification of the primary electrophysical parameters that determine the PD process is given. The concept of secondary process parameters is introduced. The relationship between the parameters of the defect model and the measured parameters is formalized. It is postulated that it is necessary to use a pair of special algorithms (called direct and inverse PD transformations) that solve mutually inverse problems – the analysis of the PD process and the diagnosis of the parameters of the defect model. As an example, it is presented a quasi-deterministic defect model that allows identifying special properties of the PD series that are useful in analyzing the PD against the background of noise, as well as in the differential diagnosis of defects.*

*Key words:* mathematical model, insulation defect, partial discharges.

### Введение

Техническое состояние элементов высоковольтного электрооборудования (ВВО) обуславливается множеством (потенциальных) дефектов, т.е. посторонних включений (например, газовых) в его электрической изоляции. В каждом дефекте под рабочим напряжением возникают частичные разряды (ЧР). Во многих публикациях анализируется процесс ЧР при различных предположениях [1, 2, 4–16]. Степень подробности анализа может варьироваться от РС-цепочки до представления процесса ЧР с помощью теории плазмы. Далеко не всегда строго оговариваются неучитываемые параметры. Строятся модели для диагностики дефектов и распознавания ЧР, но усложнение анализа не дает конструктивного выхода с точки зрения диагностики. Формальное признание практической

---

\*КИНСИТ Николай Владимирович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ПЕТРУНЬКО Наталья Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток). \*E-mail: kin@dvo.ru

невозможности непосредственных измерений ЧР [ГОСТы], традиционное использование понятия «кажущегося» заряда, а также частая практическая синонимичность понятий «частичные разряды» и «дефекты» осложняют понимание деталей рассматриваемых постановок задач [3].

Целью настоящего исследования является упорядочение и методический анализ понятий о параметрах моделей дефектов и перспектив практической диагностики с теоретической точки зрения.

### **Методология технической диагностики и дефекты в изоляции высоковольтного оборудования**

Методология ТД предусматривает четкую формализацию понятий и перечня всех возможных дефектов, перечня возможных диагностических воздействий и множества наблюдаемых реакций системы, множества всех возможных троек (дефект, воздействие, реакция). В практике диагностики изоляции элементов ВВО дефекты представляют собой дискретные объекты и физически проявляют себя в виде множества дискретных ЧР, координаты и другие параметры которых недоступны прямым измерениям.

Диагностическая модель некоторого объекта подразумевает реализацию логической цепочки анализа поведения объекта: «воздействие» → «дефект» → «наблюдаемая реакция». Задача диагностики имеет вид: («воздействия» + «наблюдаемые реакции») → «дефект(ы)». В нашем случае логическая цепочка анализа предстает в следующем виде: «рабочее напряжение» → «возможные дефекты» → «зарегистрированные ЧР».

Конечной целью мониторинга ЧР при эксплуатации оборудования является диагностика параметров дефектов. Дефект может образоваться в любой точке объема изоляции рабочего пространства элемента оборудования (ЭО); непосредственное измерение тока ЧР в дефекте невозможно. В связи с этим для измеренного косвенным образом заряда ЧР принято название «кажущегося». В ЭО может оказаться неопределенное количество дефектов на различных стадиях развития.

### **Формализация возникновения и мониторинга ЧР**

Рассматривается элемент оборудования ВВО (например, трансформатор) как сложная электрофизическая система с активным объемом изоляции  $\Omega$ . На базисном вводе элемента фиксируется рабочее синусоидальное напряжение  $u_p(t) = U_{pm} \sin(\omega t)$ . В соответствии с конструкцией элемента в каждой точке с обобщенной координатой  $X = (x, y, z) \in \Omega$  внутреннего активного объема создается электрическое поле с напряженностью  $E(X, t) : E(X, t) = E_m(U_{pm}, X) \sin(\omega t + \varphi(X))$ . В результате ЧР в произвольном  $k$ -м дефекте образуется ток  $i_k(t)$ , представляющий собой последовательность одиночных быстро затухающих ЧР  $i_{0k}(t)$ , зажигающихся в мгновения  $(t_{1k}, \dots, t_{jk}, \dots, t_{nk})$ :

$$i_k(t) = \sum_r i_{0k}(t - t_{rk}); \quad (k = 1, \dots, N), \quad (r = 1, \dots, n_k).$$

Имеется  $m$  точек съема информации  $X_j \in \Omega$ , ( $j = 1, \dots, m$ ), в которых регистрируются сигналы от каждого из дефектов  $f_{kj}(t) : f_{kj}(t) = F(h_{kj}(t), i_{kj}(t))$ , где  $h_{kj}(t)$  – соответствующая передаточная функция сигнала ЧР от  $k$ -го дефекта  $k$ -й точке наблюдения, а  $F(\dots)$  – операция свертки пары функций. На каждой из них регистрируется сумма сигналов, порожденных всеми дефектами, которую будем называть интегральной картиной (ИК) ЧР. Множественность наблюдаемых в ИК разрядов обуславливается множеством дефектов в рабочем объеме и множеством импульсов ЧР в каждом дефекте. Обратимся к перечислению свойств, параметров и сопутствующих факторов дефектов изоляции и ЧР, которые в явной или неявной форме необходимо принимать в учет при анализе процессов ЧР (см. рисунок).



Зная эти параметры для каждого дефекта, в соответствии с алгоритмом расчета в принципе можно произвести анализ ЧР, т.е. рассчитать токи ЧР  $i_k(t)$ , однако решить обратную задачу определения всех этих параметров нереально. Обладая смыслами и значениями первичных параметров дефекта, можно аналитически рассчитать целую линейку вторичных параметров, теоретически доступных измерениям (возможно, косвенным), и весь процесс ЧР в дефекте как функцию времени. Вторичные параметры вместе с основными формулами сведены в таблицу.

**Вторичные параметры дефекта**

Параметр	Выражение (формула)
Принужденное напряжение	$u_j(t) = dE(X,t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi(X))$
Начальное условие	
Постоянная заряда	$\tau_3 = R_2 C = \epsilon \gamma$
Постоянная времени разряда	$\tau_{чр} = R_1 C$
Полный заряд дефекта	$Q_{0max} = \pi / 4 \epsilon_0 E_{пр} d_k^2$
ВАХ разряда	Общий вид ВАХ известен как ВАХ газового разряда
Дифференциальное сопротивление ВАХ	$R_o = -dU / dI$
Амплитуда импульса тока ЧР	$I_m = U_3 / R_1$
Напряжение погасания ЧР	$U_n = U_3 R_1 / R_o$
Длительность ЧР	$t_{чр} = \tau_{чр} \ln(U_n / U_3)$
Параметры серии ЧР	$N \approx 2((U_m - U_3) / (U_3 - U_o) + 1) \pm 1$

### Диагностическая модель дефекта

Успех решения задачи диагностики зависит от разумного выбора минимального множества искомых и наблюдаемых параметров без потери смысла задачи. Формализуем соответствующие понятия. Рассматривается элемент ВВО, содержащий в себе  $N$  дефектов. Каждый  $k$ -й дефект характеризуется вектором действительных физических параметров  $\mathbf{P}_k = (p_{k1}, \dots, p_{kn})$ , определенных на  $n$ -мерном пространстве  $\mathbf{P}$  первичных параметров. Каждый  $k$ -й дефект генерирует на интервале наблюдения  $T_0$  ток ЧР. Регистрируемый электрический режим дефекта является исходной информацией для решения (обратной) задачи диагностики искомых параметров дефекта. Так, ток ЧР как релаксационная

последовательность (серия)  $N_k$  импульсов имеет вид  $i_k(t) = (i_{0k}(t), \mathbf{T}_k)$ , где  $i_{0k}(t)$  – функция единичного импульса ЧР,  $\mathbf{T}_k = (t_{1k}, \dots, t_{jk}, \dots, t_{nk})$ , ( $k = 1, \dots, N$ ), ( $j = 1, \dots, N_k$ ) – мгновения зажигания ЧР в дефекте. Ток в дефекте представляет собой сумму:

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

Детерминированный алгоритм однозначного расчета тока ЧР  $i_k(t)$  на основе параметров дефекта  $\mathbf{P}_k$  назовем прямым ЧР-преобразованием **PDT** (Partial Discharge Transformation):

$$i_k(t) = \mathbf{PDT}(\mathbf{P}_k).$$

Для алгоритма обратной задачи расчета параметров дефекта по значениям серии  $i_k(t)$  (если он существует) используем понятие обратного ЧР-преобразования **PDT**<sup>-1</sup> [1]:

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{PDT}^{-1}(i_k(t)).$$

В приведенных определениях подразумевается, что для расчета тока ЧР вектор параметров  $\mathbf{P}$  может содержать как первичные, так и вторичные параметры дефекта, а способ представления тока ЧР  $i_k(t)$  сопровождается соответствующими содержательными ограничениями и комментариями по специфике используемой информации. Диагностика ЧР возможна лишь при взаимно однозначных прямом и обратном преобразованиях:

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

**Квазидетерминированная модель дефекта.** Изложены положения, реализованные в виде квазидетерминированной модели (КДМ) дефекта [1]. Параметрами дефекта  $\mathbf{P}_k = (U_{mk}, U_{zk}, U_{nk}, U_{0k})$ , где  $U_m$  – амплитуда принужденного напряжения;  $U_z$  и  $U_n$  – напряжения зажигания и погасания ЧР;  $U_0$  – начальное напряжение; импульс тока ЧР принят в виде единичного разряда (ЕР):

$$i_0(t)|_{t=0} = 1; \quad i_0(t)|_{t>0, t<0} = 0; \quad \tau_{\text{чр}} = 0, \tau_s \gg T.$$

В порядке нормировки примем  $U_{zk} = 1$ . Эти четыре параметра опосредованно включают в себя геометрические координаты, картину электрического поля в данной точке активного объема трансформатора, характерные размер и форму включения, диэлектрические свойства основной изоляции и включения, поляризационные параметры тангенса потерь, а также свойства вольтамперной характеристики ЧР. На основе этих параметров можно однозначно рассчитать серию ЧР в  $k$ -м дефекте, в том числе множество моментов времени ЧР для данного дефекта  $T_k = \{t_{kj}\}$ . В соответствии с выражением для тока ЧР, поскольку  $U_{zk} = 1$ ,  $i_{0k}(t) = 1$ , получаем распределение ЕР во времени как решение задачи анализа процесса ЧР:

$$(\mathbf{T}_k) = \mathbf{PDT}(U_{mk}, 1, U_{nk}, U_{0k}).$$

Можно показать, что, при некоторых разумных ограничениях, измерив множество мгновений ЧР  $T_k$ , можно решить обратную задачу диагностики параметров дефекта:

$$\mathbf{P}_k = (U_{mk}, 1, U_{nk}, U_{0k}) = \mathbf{PDT}^{-1}(\mathbf{T}_k).$$

Исследование КДМ дает возможность выразить фундаментальные свойства серий ЧР в аналитической форме, реализуемые в конкретном алгоритме **PDT**<sup>-1</sup>. Эти свойства заключаются в том, что: серия состоит из пары фрагментов, ассоциированных с двумя полупериодами принужденного напряжения; момент зажигания первого ЕР, расстояния между соседними ЕР, расстояние между первым и последним ЕР фрагмента серии и расстояние между фрагментами серий множества  $\mathbf{T}_x = (t_{1k}, \dots, t_{jk}, \dots, t_{nk})$  не произвольны, а взаимно однозначно увязаны с параметрами КДМ  $\mathbf{P} = (U_m, U_z, U_n, U_0)$ . Перечисленные свойства позволяют наметить перспективу эффективного выделения ЧР на фоне помех и разделять смесь сигналов ЧР на компоненты, соответствующие отдельным дефектам.

## Заклучение

Систематизирован перечень первичных электрофизических параметров, введен в рассмотрение открытый перечень вторичных параметров, используемых при анализе и диагностике процессов ЧР в изоляции элемента ВВО.

Формализована связь задач анализа и диагностики ЧР в дефектах с параметрами модели дефекта в виде алгоритмов прямого и обратного ЧР-преобразований.

Конкретизированы особенности серий ЧР на примере квазидетерминированной модели дефекта и намечены перспективы ее применения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Киншт 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.
2. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Концепция оценки частичных разрядов // *Электричество*. 2018. № 2. С. 27–33.
3. Овсянников А.Г. Недомолвки в теории и недостатки в практике регистрации частичных разрядов // *Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования: материалы 12-й ежегод. конф. Пермь, 2015.* –<http://dimrus.ru/conf2015.html> (дата обращения: 23.11.2018).
4. Fan Wenbo, Guan Shilei, Fu Jinwei, Li Lisheng, Li Jianxiu, Wang Wei, Yan Xiaoyu. Comparison study of partial discharge detection methods for switchgears // *Proc. of the 2016 Int. conf. on condition monitoring and diagnosis (CMD2016)*, Xi'an, China, 2016. P. 318–322.
5. Judd M.D., Yang L., Hunter I.B. Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Pt I. Sensors and signal interpretation // *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2005. Vol. 21. P. 5–14.
6. Kinsht N.V., Petrunko N.N. Theoretical and experimental problems of the PD parameters estimation // *Proc. of the 9th International scientific symposium on electrical power engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017*. Stara Lesna, Slovakia, 2017. P. 274–278.
7. Kolcunova I., Sipos M. Measurement of Partial Discharge Picture in disc-shaped voids // *Proc. of the 8th International scientific symposium on electrical power engineering, ELEKTROENERGETIKA 2015*, Stará Lesná, Slovakia, 2015. P. 322–325.
8. Lai K., Phung B., Blackburn T., Muhamad N. Classification of partial discharge using PCA and SOM // *Proc of the Int. Power Eng. Conf. (IPEC)*, 2007. P. 1311–1316.
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. Vol. 18. P. 303–311.
10. Lin Y.H. Using K-means clustering and parameter weighting for partial discharge noise suppression // *IEEE Trans. Power Del.* 2011. Vol. 26. P. 2380–2390.
11. 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. Vol. 20. P. 468–478.
12. 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.* Vol. 15. P. 1576–1583.
13. Nik Ali N.H., Hunter J.A., Rapisarda P., Lewin P.L. Identification of multiple partial discharge sources in high voltage transformer windings // *Proc. of the IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom.*, 2014. P. 188–191.
14. Nik Ali N.H., Rapisarda P., Lewin P.L. Separation of multiple partial discharge sources within a high voltage transformer winding using time frequency sparsity roughness mapping // *Proc. of the 2016 Int. conf. on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2016)*, Xi'an, China, 2016. P. 225–228.
15. Peng X., Zhou C., Hepburn D.M., Judd M.D., Siew W. Application of K-Means method to pattern recognition in on-line cable partial discharge monitoring // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2013. Vol. 20. P. 754–761.
16. 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. Vol. 15, iss. 6. P. 1663–1674.