

7. *Клевцов С.И.* Прогнозирование изменения состояния параметров технического объекта с помощью интеллектуального микропроцессорного модуля // Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и нанозлектронных систем (МЭС)». Сборник трудов. – 2010. – № 1. – С. 619-623.
8. *Лукашин Ю.П.* Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Е. Панич.

**Клевцов Сергей Иванович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: sergkmps@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328025; к.т.н.; доцент.

**Klevtsov Sergey Ivanovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: sergkmps@mail.ru; 81, Petrovsky street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328025; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.315.2/075.8

**М.Н. Дубяго**

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ\***

*Показана взаимосвязь характеристик частичных разрядов (ЧР) с состоянием электрической изоляции силовых кабельных линий (СКЛ). Рассмотрены вопросы старения и разрушения изоляции ЧР СКЛ в условиях эксплуатации. Отмечено, что регистрация характеристик ЧР позволяет оценить качество изоляции и выявить местные дефекты, которые практически невозможно определить обычными испытаниями высоким напряжением или измерениями каких-либо интегральных характеристик изоляции (тангенс угла диэлектрических потерь, сопротивление изоляции и др.). Показано, что для наблюдения за характеристиками ЧР необходимо, использовать модели MATLAB Simulink, позволяющие выявить максимальный ЧР, количество частичных значений разряда, содержание частичного импульсного разряда и другие параметры. Методика расчета может быть использована для моделирования старения и отказа электрической изоляции. Показано, что исследование появления включения, процесса старения и достижения предельного состояния изоляции необходимо для диагностики и оценки остаточного ресурса изоляции систем электроснабжения.*

*Электрическая изоляция; частичные разряды; моделирование старения.*

**M.N. Dubyago**

#### **RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF PARTIAL DISCHARGE IN ELECTRIC INSULATION OF SYSTEMS OF POWER SUPPLY**

*The relationship of partial discharge (PD) with the state of the electrical insulation of power cable lines (PCL). The problems of aging and failure insulation PD PCL in the field. It is noted that the registration of PD to evaluate the quality of insulation and identify local defects that are almost impossible to conventional high voltage tests or measurements of any integral characteristics of the insulation (the dielectric loss tangent, insulation resistance, etc.). It is shown that for monitoring the characteristics of PD is necessary to use MATLAB Simulink models help identify*

---

\* Работа поддержана грантом РФФИ №213-01.-24/2013\_96:офи\_м\_РЖД «Разработка и исследование распределенной системы интеллектуального управления процессом производства, передачи и распределения энергии».

the maximum PD, the number of PD values, the contents of the PD pulse, and more. Method of calculation may be used for the simulation of aging and failure of electrical insulation. It is shown that the study of the appearance of inclusion of the aging process and achieve the ultimate state of isolation is necessary to diagnose and assess the residual life of insulation of electrical systems.

Electrical insulation; partial discharges; modeling aging.

**Введение.** Анализ современных методов и средств диагностики изоляции под рабочим напряжением показывает высокую эффективность метода, основанного на измерении характеристик ЧР [1, 5]. Взаимосвязь характеристик ЧР с состоянием электрической изоляции известна давно [2, 3]. Разработка более совершенной методики расчета электрической изоляции СКЛ по длительной электрической прочности является сложной задачей. Такая методика основывается на математическом моделировании старения и отказа электрической изоляции (ЭИ). Исследование процесса старения и достижения предельного состояния изоляции СКЛ необходимо для разработки как методов электрического расчета, так и диагностики и оценки остаточного ресурса. Методику расчета составляет подход, основанный на соотношениях, – степенном законе старения

$$E^n \tau = const, \quad (1)$$

и двух- или трехметрическом распределении Вейбула

$$F(E) = 1 - \exp\left(-\frac{E-E_i}{E_0-E_i}\right)^b, \quad (2)$$

где  $F(E)$  – вероятность отказа,  $b$  – параметр формы,  $E_0$  – параметр масштаба,  $E_i$  – параметр сдвига распределения.

Выражение (1), справедливо для весьма грубых дефектов типа больших газовых включений. При таких дефектах основным механизмом старения электрической изоляции являются частичные разряды и выражения (1, 2), определяющие методику электрического расчета. Разработка модели старения, учитывающая качество изоляции, может быть получена путем измерения совокупности характеристик ЧР.

**Механизм явления ЧР.** Пусть к изоляции находящейся между электродами (рис. 1,а, где  $C_B$  – емкость включения,  $C_D$  – емкость диэлектрика, расположенного последовательно с включением,  $C_A$  – емкость диэлектрика) приложено синусоидальное напряжение  $u = U_m \sin \omega t$ , то при отсутствии ЧР напряжение на емкости включения  $C_B$  будет синусоидальным,  $u_B = U_{Bm} \sin \omega t$ , где  $U_{Bm}$  – амплитуда напряжения на включении [4].

$$U_{Bm} = U_m C_D / (C_B + C_D) = U_m \eta, \quad (3)$$

где  $\eta = C_D / (C_D + C_B)$ .

Представим включение в виде прослойки толщиной  $d_e$ , вытянутой поперек силовых линий поля:

$$U_{Bm} = \frac{U_m \varepsilon_D (d - d_B)}{\left(\frac{\varepsilon_B}{d_B} + \frac{\varepsilon_D}{d - d_B}\right)} = U_m \frac{\varepsilon_D d_B}{\varepsilon_B (d - d_B) + \varepsilon_D d_B}. \quad (4)$$

В момент воздействия на изоляционную структуру первого полупериода напряжения (рис. 2) ЧР возникнет тогда, когда напряжение на включении (емкость  $C_B$ , рис. 1) достигнет значения  $U_{B,з}$  (напряжения зажигания разряда во включении). При пробое напряжение на включении падает до  $U_{B,п}$  (напряжения погасания разряда во включении), при котором разряд гаснет. После погасания разряда напряжение на включении начинает нарастать от значения  $U_{B,п}$  по кривой, соответствующей изменению приложенного напряжения, смещенной по вертикали на значение постоянной составляющей, возникшей вследствие появления зарядов на поверхности включения (на емкости  $C_B$ ). Когда напряжение  $U_B$  на емкости  $C_B$  достигнет значения  $U_{B,з}$ , процесс повторяется.

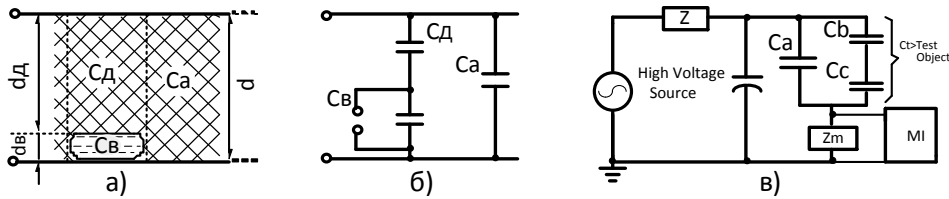


Рис. 1. Изоляционная структура (а), эквивалентная схема (б), схема для обнаружения ЧР в изоляции (в)

Следовательно, разряды в рассматриваемой области диэлектрика повторяются через промежутки времени, соответствующие изменению напряжения на  $C_B$  на  $\Delta U_B = U_{B.3} - U_{B.п.}$  При прохождении напряжения через максимум включение находится под напряжением, значение которого лежит в интервале между  $U_{B.3}$  и  $U_{B.п.}$ . Затем происходит уменьшение напряжения на включении до 0 и дальнейший рост до  $-U_{B.3}$ . В первом приближении можно принять, что при обеих полярностях пробивное напряжение включения одинаковое. При достижении напряжением на включении значения  $-U_{B.3}$  происходит пробой включения и процесс продолжается (рис. 1, где  $V_a$  – напряжение на целой части и  $V_c$  – напряжение на включении).

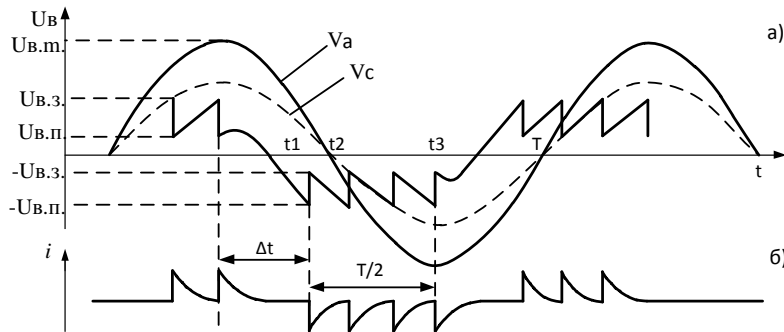


Рис. 2. Развитие во времени ЧР: а – напряжение и б – ток в полости

При таком механизме явления ЧР должны прекращаться при прохождении напряжения через максимум и вновь возникать, когда напряжение на выводах испытываемого объекта достигнет значения  $U_1$ , соответствующего изменению напряжения на включении на  $U_{B1} \approx U_{B.3} + U_{B.п.}$ :

$$U_1 = \frac{U_{B.3} + U_{B.п.}}{\eta} = \frac{U_{B1}}{\eta}$$

В дальнейшем, после возобновления ЧР, в рассматриваемой области диэлектрика, по-прежнему, повторяются через промежутки времени, соответствующие изменению напряжения на емкости  $C_B$  на  $\Delta U_B$ :

$$\Delta U = \frac{\Delta U_B}{\eta} \tag{5}$$

Таким образом, число разрядов во включении за один полупериод

$$m_{ч.р.} = \frac{2U_{Bm} - (U_{B.3} + U_{B.п.})}{U_{B.3} - U_{B.п.}} + 1 = \frac{2(U_{Bm} - U_{B.п.})}{\Delta U_B} = \frac{2(U_{Bm} - U_{B.п.}')}{\Delta U} \tag{6}$$

где  $U_{B.п.}' = \frac{U_{B.п.}}{\eta}$ . При  $U_{B.3.} \approx U_{B.п.}$  и  $\frac{U_{B.3.}}{\eta} = U_3 = U_{ч.р.}$  имеем:

$$m_{\text{ч.р.}} \approx \frac{2(U_{\text{вм}} - U_{\text{в.з}})}{\Delta U_{\text{в}}} = \frac{2(U_m - U_{\text{ч.р.}})}{\Delta U}. \quad (7)$$

При  $U_{\text{в.п}} \ll U_{\text{в.з}}$

$$m_{\text{ч.р.}} = \frac{2U_{\text{вм}}}{U_{\text{в.з}}} = \frac{2U_m}{U_{\text{ч.р.}}}, \quad (8)$$

При этом число разрядов во включении  $n_{\text{ч.р.}}$  за 1с будет

$$n_{\text{ч.р.}} = 2fm_{\text{ч.р.}}, \quad (9)$$

где  $f$  – частота приложенного напряжения.

Учитывая  $W_{\text{ч.р.}} = W_H - W_K = \frac{(C_{\text{в}} + C_{\text{д}})(U_{\text{в.з}}^2 - U_{\text{в.п}}^2)}{2}$ ,  $P_{\text{ч.р.}} = n_{\text{ч.р.}}W_{\text{ч.р.}}$  и (4), мощность ЧР  $P_{\text{ч.р.}}$  в одном включении может быть представлена в виде

$$P_{\text{ч.р.}} = W_{\text{ч.р.}}n_{\text{ч.р.}} = 2f(C_{\text{в}} + C_{\text{д}})(U_{\text{в.з}} + U_{\text{в.п}})(U_{\text{вм}} - U_{\text{в.п}}), \quad (10)$$

если  $U_{\text{в.з}} \approx U_{\text{в.п}}$ , то

$$P_{\text{ч.р.}} = 4f(C_{\text{в}} + C_{\text{д}})U_{\text{в.з}}(U_{\text{вм}} - U_{\text{в.з}}) = 4fC_{\text{д}}U_{\text{в.з}}(U_m - U_{\text{ч.р.}}) \quad (11)$$

если  $U_{\text{в.п}} = 0$ , то

$$P_{\text{ч.р.}} = 2f(C_{\text{в}} + C_{\text{д}})U_{\text{в.з}}U_{\text{вм}} = 2fC_{\text{д}}U_{\text{в.з}}U_m. \quad (12)$$

Из (10–12) следует, что для одного включения или при фиксированном количестве одинаковых включений мощность ЧР линейно возрастает с ростом приложенного напряжения. При  $U_{\text{в.з}} \approx U_{\text{в.п}}$ , учитывая  $W_{\text{ч.р.}} = q_{\text{ч.р.}}U_{\text{ч.р.}}$  и  $P_{\text{ч.р.}} = n_{\text{ч.р.}}W_{\text{ч.р.}}$ , мощность ЧР может быть также представлена в следующем виде:

$$P_{\text{ч.р.}} = q_{\text{ч.р.}}U_{\text{ч.р.}}n_{\text{ч.р.}} = I_{\text{ч.р.}}U_{\text{ч.р.}}, \quad (13)$$

соответственно при  $U_{\text{в.п}} \ll U_{\text{в.з}}$ , учитывая (1–17) и (1–23),

$$P_{\text{ч.р.}} = \frac{q_{\text{ч.р.}}U_{\text{ч.р.}}n_{\text{ч.р.}}}{2} = \frac{I_{\text{ч.р.}}U_{\text{ч.р.}}}{2}. \quad (14)$$

На основании  $P_{\text{ч.р.}} = 1/(q_{\text{ч.р.1}}U_1 + q_{\text{ч.р.2}}U_2 + \dots + q_{\text{ч.р.m}}U_m)t_1$ , мощность  $P_{\text{ч.р.}}$ , выделяемая в единичном включении, может быть также представлена в виде

$$P_{\text{ч.р.}} = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^{m_{\text{ч.р.}}} q_{\text{ч.р.i}}u_i, \quad (15)$$

где  $u_i$  – мгновенное значение напряжения на диэлектрике в момент времени разряда с кажущимся зарядом  $q_{\text{ч.р.i}}$ ;  $m_{\text{ч.р.}}$  – общее количество разрядов в единичном включении за полупериод  $T/2$ . При использовании (15) необходимо учитывать знаки при  $q_{\text{ч.р.i}}$  и  $u_i$ .

Рассмотрим один полупериод (рис. 2) от максимума напряжения одной полярности до максимума напряжения противоположной полярности, и определим энергию  $W_{T/2}$ , подводимую к выводам изоляционной структуры (рис. 1,а) за полупериода  $T/2$ , для компенсации энергии, выделившейся во включении вследствие ЧР. Энергия ЧР, возникающая от момента времени  $t_1$  до момента времени  $t_2$ , соответствующего переходу напряжения через нуль, должна быть взята с одним знаком, а энергия ЧР, возникающих от момента времени  $t_2$  до момента времени  $t_3$ , соответствующего переходу напряжения через максимум, – с другим.

Если принять  $q_{\text{ч.р.i}} = q_{\text{ч.р.}} = \text{const}$ , то формула

$$P_{\text{ч.р.}} = \frac{1}{(q_{\text{ч.р.1}}U_1 + q_{\text{ч.р.2}}U_2 + \dots + q_{\text{ч.р.m}}U_m)t_1}$$

может быть представлена в следующем виде:

$$P_{\text{ч.р.}} = \frac{2}{T} q_{\text{ч.р.}} \{ -[\Delta U + 2\Delta U + \dots + (m_1 - 1)\Delta U + (U_m - U_1)] + [\Delta U + 2\Delta U + \dots + m_2 - 1\Delta U + Um = 2Tq_{\text{ч.р.}}Um - U1 + \Delta U + Um - U1 + \Delta U + \dots + Um - U1 + m_3 - 1\Delta U + Um, \quad (16)$$

где  $m_1 = (U_m - U_1)/\Delta U$ ;  $m_2 = U_m/\Delta U$ ;  $m_3 = m_2 - m_1 = U_1/\Delta U$ .

Формула (16) может быть преобразована к виду

$$P_{ч.р.} = q_{ч.р.} m_3 f(2U_m - U_1 + \Delta U) = \frac{q_{ч.р.} f U_1 (2U_m - U_1 + \Delta U)}{\Delta U}. \quad (17)$$

Учитывая (16) и (17), имеем

$$P_{ч.р.} = \frac{q_{ч.р.} U_1 n_{ч.р.}}{2} = \frac{I_{ч.р.} U_1}{2}. \quad (18)$$

$$\text{При } U_{в.з} = U_{в.п} \text{ имеем } U_1 \approx 2U_{ч.р.} \text{ и } P_{ч.р.} = I_{ч.р.} U_{ч.р.} \quad (19)$$

$$\text{При } U_{в.п} \ll U_{в.з} P_{ч.р.} = I_{ч.р.} U_{ч.р.} / 2 = 2f q_{ч.р.} U_m. \quad (20)$$

Мощность, расходуемая во включении (13, 14) и подводимая к изоляционной структуре (19, 20), показывает их идентичность.

**Прогнозирование появления включения.** С ростом напряжения изоляции количество включений, в которых возникают ЧР, увеличивается, что приводит к более сильной зависимости числа разрядов в секунду и мощности ЧР от напряжения, чем по формулам (16, 19, 20). Увеличение с ростом напряжения числа включений, в которых возникают ЧР, происходит в соответствии со статистическим разбросом напряжений зажигания ЧР в отдельных включениях. Распределение напряжений зажигания ЧР подчиняется нормальному закону со средним значением  $U_{в.з.ср}$  и среднеквадратичным отклонением  $\sigma_{в.з.}$ . Таким образом, плотность вероятности появления включений с напряжением зажигания ЧР  $U_{в.з.}$  равна

$$f(U_{в.з.}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{в.з.}} \exp\left[-\frac{(U_{в.з.}-U_{в.з.ср})^2}{2\sigma_{в.з.}^2}\right], \quad (21)$$

а вероятность появления включения с напряжением зажигания менее  $U_{в.з.}$  составляет

$$F(U_{в.з.}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{в.з.}} \int_0^{U_{в.з.}} \exp\left(-\frac{(U_{в.з.}-U_{в.з.ср})^2}{2\sigma_{в.з.}^2}\right) dU_{в.з.} \quad (22)$$

Переходя к напряжениям на выводах испытуемого объекта, имеем

$$U_{ч.р.} = U_{в.з.}/\eta; \quad U_{ч.р.ср.} = U_{в.з.ср.}/\eta; \quad \sigma_{ч.р.} = \sigma_{в.з.}/\eta;$$

и

$$F(U_{ч.р.}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ч.р.}} \int_0^{U_{ч.р.}} \exp\left(-\frac{(U_{ч.р.}-U_{ч.р.ср.})^2}{2\sigma_{ч.р.}^2}\right) dU_{ч.р.} \quad (23)$$

При напряжении, меньшем напряжения начальных ЧР  $U_H$ , вероятность возникновения ЧР во включении должна быть достаточно мала. В области малых вероятностей, зависимость  $F(U)$ , а следовательно, и определяемые ею зависимости  $n_{ч.р.}(U)$  и  $I_{ч.р.}(U)$  имеют вид

$$\begin{aligned} F(U) &= A_1 (U/U_H)^{a_1} n_{ч.р.} = n_{ч.р.0} (U/U_H)^{a_1} = A_2 U^{a_1} = A_2' E^{a_1}; \\ I_{ч.р.} &= I_{ч.р.0} (U/U_H)^{a_1} = A_3 U^{a_1} = A_3' E^{a_1}, \end{aligned} \quad (24)$$

где  $a_1 = 4U_H/\sigma_{ч.р.}$ ,  $n_{ч.р.0}$  и  $I_{ч.р.0}$  – число ч. р. и ток ч. р. при напряжении  $U_H$ .

Учет статистического разброса напряжения зажигания ЧР в отдельных включениях приводит к тому, что мощность ЧР зависит от напряжения более сильно, чем по (10). Так как в этом случае ЧР во включениях, с наибольшим напряжением зажигания, а следовательно, обладающие и наибольшей энергией, возникают вблизи амплитуды приложенного напряжения, то  $P_{ч.р.} \approx I_{ч.р.} U_m$ . Учитывая  $I_{ч.р.}$  (24), имеем

$$P_{ч.р.} = A_4 U^{a_1+1} = A_4 U^a = P_{ч.р.0} (U/U_H)^a = A_4' E^a. \quad (25)$$

Таким образом, учет статистического разброса напряжения зажигания ЧР в отдельных включениях приводит к степенной зависимости мощности ЧР от напряжения. Значение кажущегося заряда связано с физическим механизмом развития разрядов. Начальные ЧР с интенсивностью до  $10^{12}-10^{11}$  Кл при длительном воздействии напряжения вызывают старение изоляции и разрушение. При дальнейшем повышении напряжения в изоляции резко возрастает кажущийся заряд единичного ЧР, обусловленный изменением физики развития ЧР, например, образование дендрита в твердой изоляции. Такие ЧР называются критиче-

скими и характеризуются кажущимся зарядом  $\sim 10^{-8} - 10^{-7}$  Кл – для аппаратной и кабельной изоляции. Интенсивность определяется конструкцией, структурой изоляции и объемом, в котором развиваются разряды. Критические ЧР приводят к более интенсивному разрушению изоляции и их возникновение резко сокращает срок службы изоляционной конструкции. Эти разряды так же, как и начальные ЧР имеют степенную зависимость характеристик от напряжения (напряженности электрического поля) в соответствии с (25), однако для них показатель степени  $a$  имеет значительно большие значения, чем для начальных ЧР, и обычно лежит в пределах 12–16.

**Результаты моделирования и обсуждения.** Непосредственно в высоковольтном энергетическом оборудовании характеристики ЧР не могут быть измерены. Следовательно для наблюдения за характеристиками ЧР необходимо использовать модели MATLAB Simulink. Модель содержит область с пониженной электрической прочностью (включение). Модель для обнаружения ЧР с использованием MATLAB состоит из трех конденсаторов, рис.1,б. Конденсатор  $C_c$  представляет емкость пустоты в исследуемом объекте,  $C_b$  – емкость здоровой части, соединенной последовательно с пустотой,  $C_a$  – емкость здоровой части изолятора. Емкости значения трех конденсаторов могут быть рассчитаны:

$$\begin{aligned} C_c &= (\varepsilon_0 A)/t = 2.079 * 10^{-13} F; \\ C_b &= (\varepsilon_0 \varepsilon_r A)/(d - t) = 5.420 * 10^{-13} F; \\ C_a &= (\varepsilon_0 \varepsilon_r A)/d = 30.6 * 10^{-13} F. \end{aligned}$$

Параметры, используемые для моделирования: Высоковольтный измерительный конденсатор  $C_m = 1000$  пФ, разделительный конденсатор  $C_k = 1000$ , мкФ, диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_0 = 8,85 * 10^{-12}$  Ф/м, относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r = 3,5$ . Сопротивление  $R = 50$ , Ом, Индуктивность  $L = 0,60$  мГн, Емкость  $C = 0,45$  мкФ. Характерные осциллограммы ЧР приведены на рис. 5 при 5 кВ, где пики – это всплески активности ЧР. Необходимо проанализировать каждый из выявленных частичных разрядов с выделением явно выраженных (задача отделения сигналов ЧР, возникающих в изоляции от внешних и внутренних помех различного происхождения, рис. 1,в, решается способом селекции сигналов ЧР с использованием вейвлет-анализа [6]). После этого определяется расстояние на кабеле до его источника.

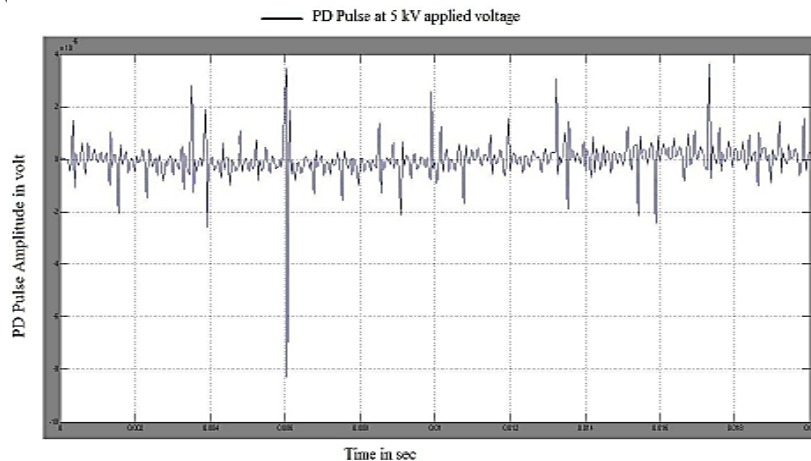


Рис. 5. Характерные осциллограммы ЧР при 5кВ

Таким образом, MatLab Simulink модели, необходимы для наблюдения активности ЧР внутри твердой изоляции. Установлено, что с ростом напряжения изоляции количество включений, в которых возникают ЧР, увеличивается. На основе модели Simulink исследованы характеристики ЧР, чтобы выявить максимальный ЧР, количество частичных значений разряда, содержание частичного импульсного разряда и другие параметры ЧР.

**Заключение.** Получены зависимости характеристик ЧР от напряжения испытания. С увеличением напряжения испытания уровень частичных разрядов в изоляции оборудования повышается. Исправная изоляция имеет значение максимального кажущегося заряда намного меньшей величины даже при установленном испытательном напряжении. Таким образом, взаимосвязь характеристик ЧР с состоянием электрической изоляции не вызывает сомнений. Регистрация импульсов ЧР и их последующий анализ позволяет не только осуществлять постоянный мониторинг состояния высоковольтной изоляции, но и, при определенных условиях, выявлять характер развивающегося дефекта и место его расположения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. *Привалов И.Н.* Современные методы и технические средства для испытаний и диагностики силовых кабельных линий номинальным напряжением до 35 кВ включительно: Учеб. пособие, 2008.
2. *Nagasaki S., Yoshida N., Aihara M.* Philosophy of design and experience on high voltage XLPE cables and accessories in Japan // CIGRE. – 1988. – № 21-01. – P. 8.
3. *Sekki Y.* Recent technical progress in extrahigh-voltage XLPE cables // Hitachi Cable Review. – August 1993. – № 12. – P. 3-10.
4. *Кучинский Г.С.* Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с.
5. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Метод амплитудного и фазового распределения импульсов частичных разрядов в задачах исследовании изоляции кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 200-205.
6. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Метод селекции сигналов ЧР с помощью Вейвлет преобразований // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 99-104.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Э. Бурлакова.

**Дубяго Марина Николаевна** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: w\_m88@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89508519304; кафедра электротехники и мехатроники.

**Dubyago Marina Nikolaevna** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: w\_m88@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79508519304; the department of electric technics and mechatronics.