

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-629-638

PARTIAL DISCHARGE MODELLING: THE CASE OF HIGH VOLTAGE INSULATION ONBOARD SHIP

S. Ye. Kuznetsov, D. M. Makarov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The article deals with partial discharge modeling based on gas inclusion (defect) in high-voltage electrical insulation on board ship. For modeling a sample of insulating material used in ship high-voltage equipment, has been taken. A sample of the insulating material is described by means of three capacitors. Based on the calculated capacitance values, a replacement circuit was constructed, and then a scheme for modeling partial discharges in Matlab / Simulink program was designed. While simulating the most common voltage values applied in ship high-voltage systems have been used. The gas inclusion (defect) of a cylindrical shape, located in the middle of the insulating material, has been taken as reference. Simulation of partial discharges is performed for three gas inclusion versions differing in size. The graphs show partial discharges for which the voltage across the capacitances and the apparent charges for each defect and voltage are calculated using a formula. Dependences of the apparent charge on the area of the defect in the insulation and on the amplitude of the partial discharges are presented for different voltages. Based on these graphs, conclusions are drawn regarding the dependence of partial discharges on the supply voltage and the size of the defect within the insulating material. Spectral analysis of the simulated signals corresponding to the defects considered by the fast Fourier transform method is made and the frequency distribution of the signal depending on its amplitude is presented diagrammatically. Found values of the apparent charge allow to calculate the average value of the current, which makes it possible to estimate the intensity of partial discharges and technical condition of electrical insulation. Another problem with constant monitoring of partial discharges in high-voltage power equipment is, separating useful signal (partial discharges) from the noise component. This issue needs further detailed study.

Keywords: partial discharge, high-voltage ship electrical equipment, impulse, insulation, capacity, defect, gas inclusion.

For citation:

Kuznetsov, Sergey Ye., and Daniil M. Makarov. "Partial discharge modelling: the case of high voltage insulation onboard ship." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 629–638. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-629-638.

УДК 621.3.048.004.58

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НА ПРИМЕРЕ СУДОВОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

С. Е. Кузнецов, Д. М. Макаров

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрено моделирование частичных разрядов на примере газового включения (дефекта) в судовой высоковольтной электрической изоляции. Для моделирования взят образец одного из видов изоляционного материала, применяющийся в судовом высоковольтном оборудовании. Образец изоляционного материала описывается с помощью трех ёмкостей. По рассчитанным значениям ёмкостей построена схема замещения, а далее — схема моделирования частичных разрядов в среде Matlab/Simulink. При моделировании используются наиболее распространённые значения напряжений, которые нашли применение в судовых высоковольтных электроэнергетических системах. За основу принято газовое включение (дефект) цилиндрической формы, находящийся внутри изоляционного материала. Моделирование частичных разрядов производится для трех вариантов газового включения, различающихся в размерах. На графиках представлены частичные разряды, по формулам рассчитаны напряжения на ёмкостях и значения кажущихся зарядов для каждого дефекта и напряжения отдельно. Представлены зависимости кажущегося

заряда от площади дефекта в изоляции и амплитуды частичных разрядов при разных значениях напряжений. По этим графикам сделаны выводы о зависимости частичных разрядов от питающего напряжения и размеров дефекта внутри изоляционного материала. Произведен спектральный анализ смоделированных сигналов, соответствующих рассматриваемым дефектам методом быстрого преобразования Фурье и графически показано частотное распределение сигнала в зависимости от его амплитуды. По найденным значениям кажущегося заряда можно рассчитать среднее значение тока, что позволяет оценить интенсивность частичных разрядов и техническое состояние изоляции. Однако существует еще одна проблема при постоянном контроле частичных разрядов в силовом высоковольтном оборудовании, а именно отделение полезного сигнала (частичные разряды) от шумовых составляющих. Данный вопрос нуждается в дальнейшем детальном изучении и моделировании в среде Matlab/Simulink.

Ключевые слова: частичный разряд, высоковольтное судовое электрооборудование, электрическая изоляция, емкость, дефект, газовое включение.

Для цитирования:

Кузнецов С. Е. Моделирование частичных разрядов на примере судовой высоковольтной изоляции / С. Е. Кузнецов, Д. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 629–638. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-629-638.

Введение (Introduction)

Частичные разряды (ЧР) — электрические разряды, которые происходят в изоляции электрооборудования, обычно возникают в электрических системах, работающих при напряжении от 3000 В и выше [1]. С течением времени повторяющиеся частичные разряды разрушают изоляцию, что в конечном итоге ведет к пробое изоляции и переходу оборудования в неработоспособное состояние. В связи с этим своевременная диагностика технического состояния изоляции особенно актуальна [2].

Традиционный подход к измерению частичных разрядов описывается в ГОСТ 20074-83 «Электрооборудование и электроустановки» [3]. Однако существует несколько основных проблем при измерении активности частичных разрядов, а именно: отделение частичного разряда от шумовой составляющей, интерпретация полученных характеристик частичных разрядов с точки зрения состояния изоляции системы и прогнозирование её остаточного ресурса. Так, в работе В. П. Вдовенко [4] приводится алгоритм анализа диагностических параметров и формирования заключения о возможностях и сроках дальнейшей эксплуатации объекта измерения, в основе которого лежит сравнение кажущегося заряда с его предельным значением, однако алгоритм более применим к диагностированию высоковольтных трансформ, в отличие от высоковольтного электрооборудования в целом. В работе Ф. Р. Исмагилова и Д. В. Максудова [5] приведена математическая модель протекания частичного разряда, в которой представлена зависимость мощности частичных разрядов от размера газового включения (дефекта), а также показано графически и доказано экспериментально, что перед полным пробоем изоляции происходит снижение активности частичных разрядов [6].

Для того чтобы решать указанные проблемы нужно, прежде всего, определить характеристики частичных разрядов путем моделирования частичных разрядов в газовых включениях в судовой высоковольтной изоляции. В данной работе моделирование проводится применительно к сшитому полиэтилену как одному из видов изоляционного материала, который нашел применение в высоковольтном судовом электрооборудовании. Для сшитого полиэтилена в среде Matlab/Simulink на основании рассчитанных емкостей построена схема замещения, с помощью которой моделируются частичные разряды. Моделирование проводится при разных значениях напряжений и разных размерах газовых включений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Частичный разряд. Частичные разряды по их расположению можно разделить на два типа: внутренний, происходящий внутри обмоток силового электрооборудования, и внешний, происходящий снаружи (в линиях передач между электрооборудованием). По типу происхождения ча-

стичный разряд можно классифицировать следующим образом (рис. 1): коронный разряд, поверхностный разряд, внутренний разряд и древовидный разряд [7].

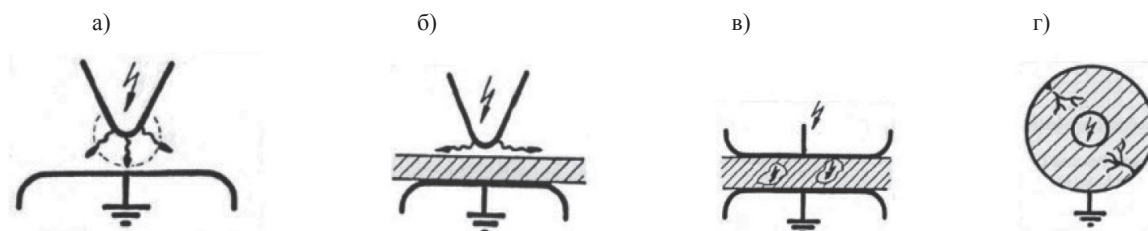


Рис. 1. Классификация типов частичных разрядов:
а — коронный; б — поверхностный; в — внутренний; г — древовидный

Коронный разряд — это разряд, происходящий при высоком напряжении из-за неравномерности электрического поля около поверхности проводника. Как правило, такой тип разряда происходит около проводника островидной формы. Этот тип разрядов может проявляться в течение долгого времени и не повреждать изоляцию высоковольтного проводника.

Поверхностный разряд — это такой тип разряда, который происходит на границе двух различных диэлектрических материалов, таких как газ и твердый диэлектрический материал.

Внутренний разряд — это разряд, возникающий в полости изоляции вследствие её брака либо нарушения технологии производства.

Древовидный разряд — это разряд, при котором интенсивность электрического поля очень высока, что, в свою очередь, приводит к появлению и ответвлению от главного частичного разряда множества других частичных разрядов, которые и формируют древовидную структуру.

В судовой высоковольтной электроэнергетической системе наиболее часто проявляются внутренний и поверхностный ЧР. Оба типа ЧР могут проявляться как в высоковольтных кабелях, так и внутри высоковольтного оборудования [8].

Описание модели. В основе компьютерного моделирования ЧР лежит изоляционный материал (XLPE), выбранный на основании технической судовой документации танкера-газовоза «Corcovado LNG» [9]. Исходя из толщины изоляции высоковольтного кабеля ($t = 3,4$ мм), выбраны следующие размеры образца изоляционного материала, используемого при моделировании: длина $l = 3,4$ мм, высота $h = 3,4$ мм и толщина $t = 3,4$ мм (рис. 2). Внутри материала имеется вакуумное пространство ($\epsilon_{\text{в}} = 1$) — дефект цилиндрической формы, расположенное по центру.

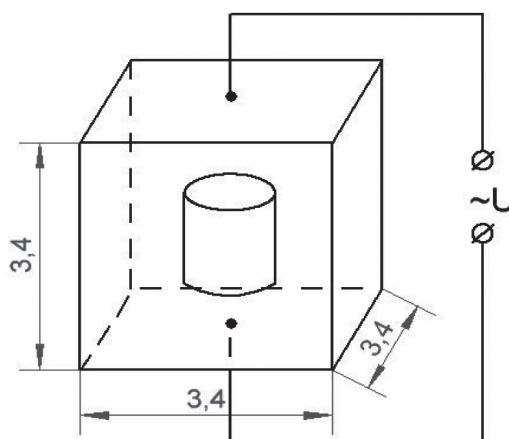


Рис. 2. Изоляционный образец, используемый при моделировании

Для моделирования импульсов ЧР необходимо собрать эквивалентную электрическую схему в Matlab/Simulink, представленную на рис. 3.

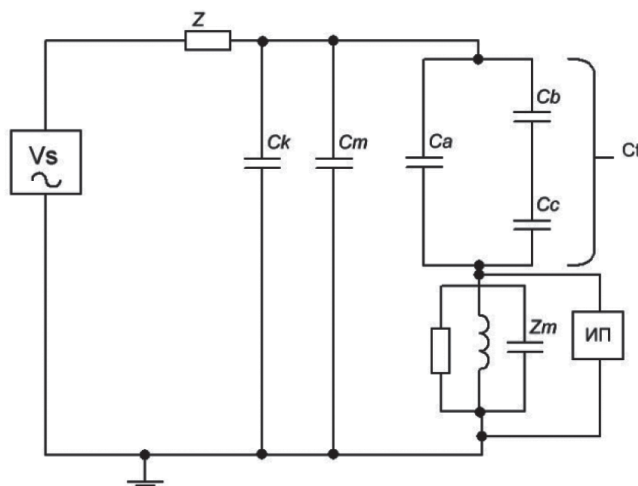


Рис. 3. Общая схема, реализуемая в Matlab/Simulink

Общая схема состоит из высоковольтного генератора V_s , токоограничительного резистора Z (полное сопротивление источника), соединительного конденсатора C_k , высоковольтного конденсатора C_m , модели изоляции с газовым включением (дефектом) C_r , содержащей внутри полость, в которой будут происходить частичные разряды, цепь регистрации и измерения частичных разрядов Z_m и измерительный прибор (осциллограф) ИП.

Модель изоляции с газовым включением представлена в виде двух последовательно соединенных электрических емкостей C_c и C_b и параллельно соединенных с емкостью C_a , где C_c — емкость, учитывающая дефект в изоляции; C_b — емкость, характеризующая неповрежденную изоляцию над и под дефектом; C_a — емкость, характеризующая остальную часть изоляции. Для обнаружения частичных разрядов используется RLC-цепь, которая представлена как Z_m .

Факторы, влияющие на импульс частичного разряда

Напряжение. Во время моделирования ЧР используются значения напряжений, применяемые на судах с высоковольтной электроэнергетической системой, а именно: 3,3 кВ, 6,6 кВ и 11 кВ с частотой питающей сети 60 Гц.

Материал изоляции проводника. В современных судовых высоковольтных системах используются сшитый полиэтилен (XLPE), полипропилен (PE), этиленпропиленовая резина (EPR) и эпоксидная смола. На основании судовой технической документации выбран сшитый полиэтилен. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{низ}}$ для сшитого полиэтилена (XLPE) равна 2,4.

Размер дефекта в изоляции. Является самым значительным фактором, оказывающим влияние на параметры импульса ЧР, а, соответственно, и на оставшийся срок службы изоляции. Для примера взято газовое включение цилиндрической формы, размеры которого указаны в табл. 1.

Таблица 1

Размеры газового включения в изоляции

Высота (h_d), мм	Радиус (r), мм	Обозначение дефекта
1	0,3	г
2	1	д
3	1,7	е

Математическое описание дефекта в изоляции

Дефект в изоляции описывается емкостью C_c . Емкостью C_b , соединенной последовательно с емкостью C_c , характеризуется изоляция над и под дефектом, так как дефект расположен по центру [10]. Емкостью C_a характеризуется неповрежденная часть изоляции. Далее представлены формулы для каждой из емкостей [11]:

$$C_a = \frac{\varepsilon_{\text{риз}} \cdot \varepsilon_0 \cdot (l^2 - r^2 \cdot \pi)}{h}; \quad (1)$$

$$C_b = \frac{\varepsilon_{\text{риз}} \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2 \cdot \pi}{h - h_d}; \quad (2)$$

$$C_c = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{рв}} \cdot r^2 \cdot \pi}{h_d}, \quad (3)$$

где l — длина кубического образца изоляции; h — высота изоляции; t — толщина изоляции; r — радиус искусственной пустоты в изоляции; h_d — высота дефекта внутри изоляции; ε_0 — диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$); $\varepsilon_{\text{рв}}$ — диэлектрическая проницаемость воздуха ($\varepsilon_{\text{рв}} = 1$); $\varepsilon_{\text{риз}}$ — диэлектрическая проницаемость сшитого полиэтилена ($\varepsilon_{\text{риз}} = 2,4$).

Напряжение V_c и кажущийся заряд q , измеренные на дефекте внутри изоляции, определяют по формулам (4) и (5):

$$V_c = \frac{V_a \cdot C_b}{(C_a + C_b)}; \quad (4)$$

$$q = C_b \cdot V_c, \quad (5)$$

где V_a — напряжение на емкости C_a .

Моделирование импульса частичного разряда в среде Matlab/Simulink

На основе формул (1), (2) и (3) рассчитывается емкость каждого участка изоляции. С помощью формул (4) и (5) определяется значения напряжений на дефекте и кажущийся заряд. Полученные результаты представлены в табл. 2 – 4 для соответствующих значений напряжения.

Таблица 2

Расчётные параметры при напряжении 3,3 кВ

Индекс дефекта	Емкость C_a , Ф	Емкость C_b , Ф	Емкость C_c , Ф	Напряжение на дефекте V_c , В	Кажущийся заряд q , Кл
г	$7,01 \times 10^{-14}$	$2,49 \times 10^{-15}$	$2,48 \times 10^{-15}$	29	$7,2 \times 10^{-14}$
д	$5,23 \times 10^{-14}$	$4,74 \times 10^{-14}$	$1,38 \times 10^{-14}$	402	$1,9 \times 10^{-11}$
е	$1,54 \times 10^{-14}$	$4,79 \times 10^{-13}$	$3,99 \times 10^{-14}$	819,5	$3,9 \times 10^{-10}$

Таблица 3

Расчётные параметры при напряжении 6,6 кВ

Индекс дефекта	Емкость C_a , Ф	Емкость C_b , Ф	Емкость C_c , Ф	Напряжение на дефекте V_c , В	Кажущийся заряд q , Кл
г	$7,01 \times 10^{-14}$	$2,49 \times 10^{-15}$	$2,48 \times 10^{-15}$	58	$1,4 \times 10^{-13}$
д	$5,23 \times 10^{-14}$	$4,74 \times 10^{-14}$	$1,38 \times 10^{-14}$	804	$3,8 \times 10^{-11}$
е	$1,54 \times 10^{-14}$	$4,79 \times 10^{-13}$	$3,99 \times 10^{-14}$	1639	$7,8 \times 10^{-10}$

Таблица 4

Расчётные параметры при напряжении 11 кВ

Индекс дефекта	Емкость C_a , Ф	Емкость C_b , Ф	Емкость C_c , Ф	Напряжение на дефекте V_c , В	Кажущийся заряд q , Кл
г	$7,01 \times 10^{-14}$	$2,49 \times 10^{-15}$	$2,48 \times 10^{-15}$	96,7	$2,4 \times 10^{-13}$
д	$5,23 \times 10^{-14}$	$4,74 \times 10^{-14}$	$1,38 \times 10^{-14}$	1341	$6,35 \times 10^{-11}$
е	$1,54 \times 10^{-14}$	$4,79 \times 10^{-13}$	$3,99 \times 10^{-14}$	2733	$1,3 \times 10^{-9}$

На основании полученных значений емкостей, описывающих газовое включение в изоляционном материале, частичные разряды моделируются с помощью электрической схемы, представленной на рис. 4. Электрическая схема реализована в программе Matlab/Simulink и состоит из следующих элементов: V_{m1} — блок измерения напряжения в цепи; R — токоограничительный резистор; C_m — со-

единительный конденсатор; C_k — высоковольтный конденсатор; C_a , C_b , C_c — конденсаторы, представляющие емкости изоляции; V_{m2} — блок измерения напряжения на дефекте; $\max(u, y)$ — блок определения максимальных/минимальных значений амплитуды; D_2 — осциллограф; D_1 — дисплей; V_{m3} — блок измерения амплитуды ЧР; PD — детектор частичных разрядов (RLC -цепь); V_s — генератор высоковольтного переменного напряжения; Powergui — блок задания параметров моделирования. В табл. 5 содержатся численные значения параметров элементов электрической схемы.

Таблица 5

Параметры, используемые при моделировании

Номер параметра	Элемент схемы	Символ	Значение	Единица измерения
1	Токоограничивающий резистор	R	10	Ом
2	Конденсатор	C_m	1000	пФ
3	Конденсатор	C_k	1000	мкФ
4	Конденсатор PD	C_{PD}	0,45	мкФ
5	Индуктивность PD	L_{PD}	0,6	мГн
6	Резистор PD	R_{PD}	250	Ом
7	Генератор напряжения	V_s	6600	В

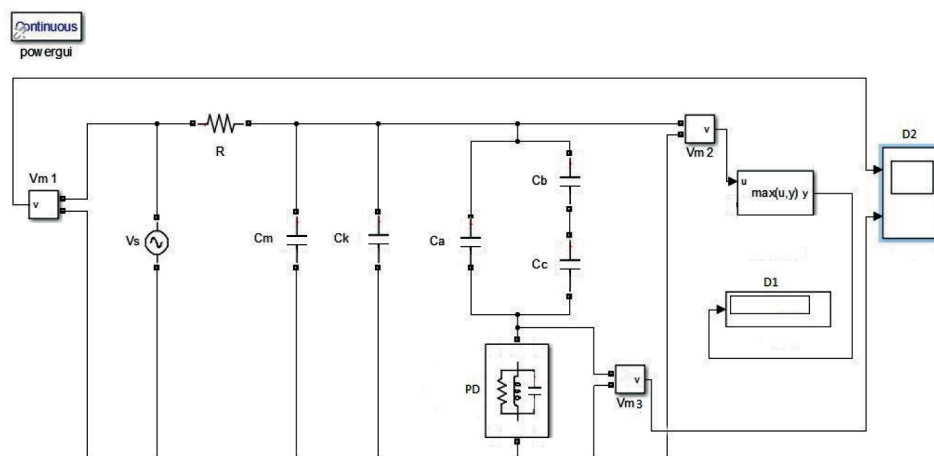


Рис. 4. Экспериментальная схема для моделирования частичных разрядов

На рис. 5 и 6 приведены результаты моделирования импульсов частичных разрядов с напряжением источника 6,6 кВ при $f = 60$ Гц и разных размерах газовых включений.

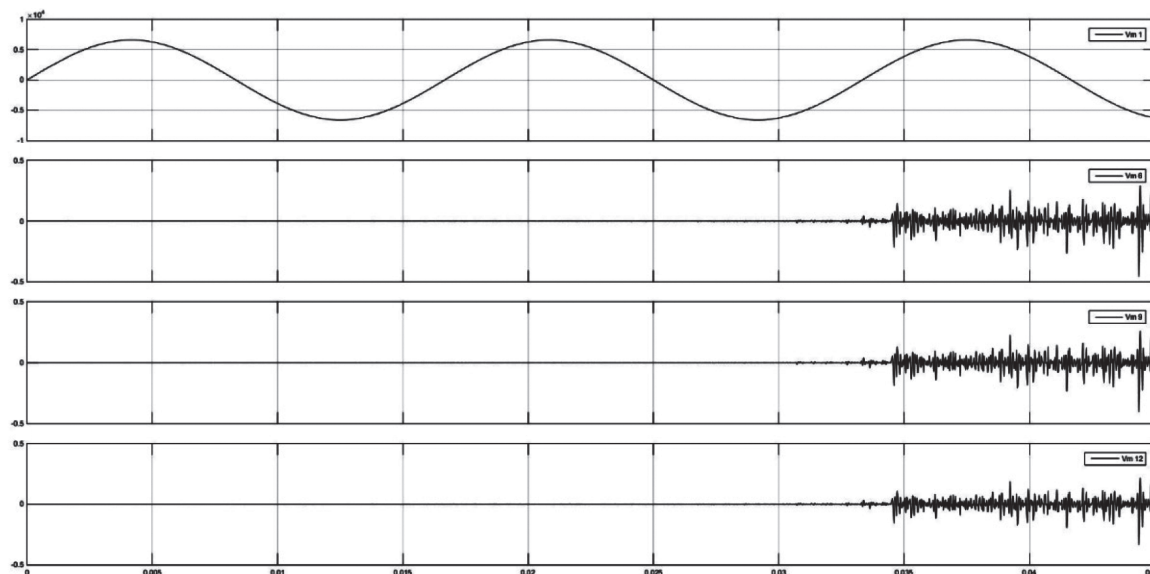


Рис. 5. Результаты моделирования ЧР при разных размерах газовых включений

Как видно из рис. 5, с увеличением в размерах дефекта внутри изоляционного материала происходит уменьшение амплитуды импульса ЧР, и наоборот, при меньших размерах — увеличение. Чтобы получить детальное представление о сигнале (распределение максимальных значений сигнала на частотном диапазоне) необходимо использовать быстрое преобразование Фурье [12], результаты которого представлены на рис. 6.

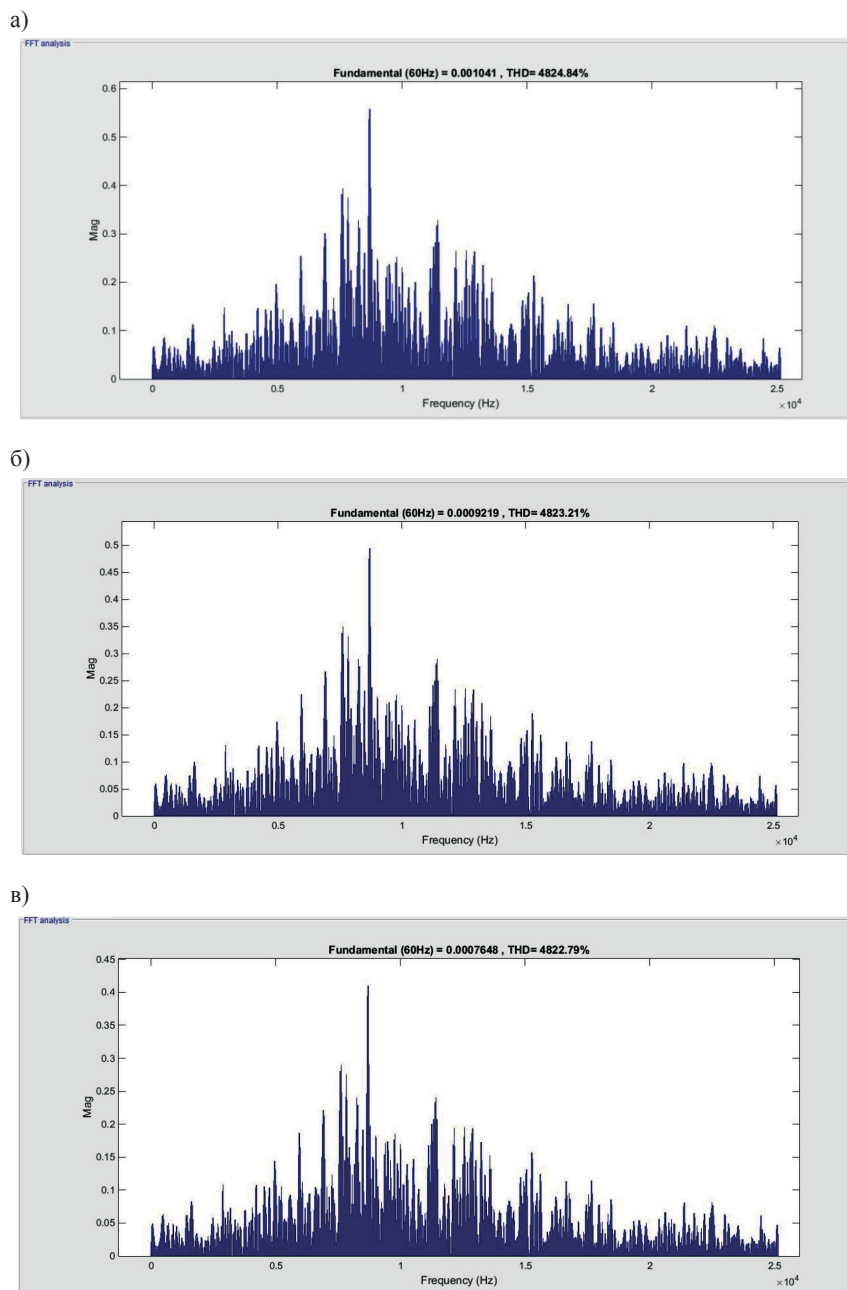


Рис. 6. Результаты спектрального анализа смоделированных ЧР при разных размерах газовых включений

На рис. 6 представлены результаты спектрального анализа смоделированных ЧР для разных размеров газовых включений. Спектры сигналов получены методом быстрого преобразования Фурье. На основании полученных спектров можно сделать вывод, что ЧР наибольшей амплитуды возникают в диапазоне от 6 кГц до 15 кГц. Кроме того, при сравнении трех графиков видно, что максимальная амплитуда ЧР зависит от размера включения, подтверждая тем самым графики, снятые с осциллографа при моделировании.

На рис. 7 показано полученное изменение кажущегося заряда q от площади поперечного сечения дефекта в изоляции ($S = \pi r^2$) при разных значениях приложенного к изоляции напряжения. Из графика можно сделать выводы, что величина кажущегося заряда возрастает с увеличением размеров дефекта в изоляционном материале. Видно, что максимальное значение кажущегося заряда соответствует максимальной площади дефекта в изоляции для трех значений напряжений. Кроме того, на величину кажущегося заряда оказывает значительное влияние приложенное напряжение, что также отображено на рис. 7.

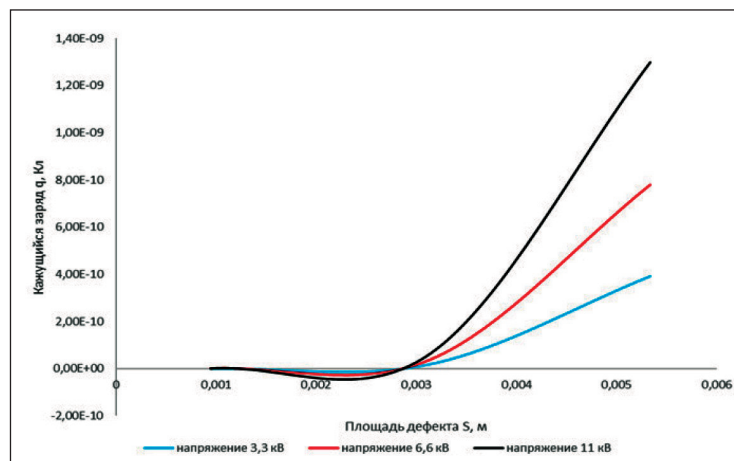


Рис. 7. Зависимость значения кажущегося заряда от площади дефекта при разных напряжениях

На рис. 8 представлены зависимости значения напряжения от амплитуды кажущегося заряда при разных дефектах. Зависимости были получены путем измерения амплитуды ЧР на блоке V_{m3} и отображением их в графической форме. На основании построенных зависимостей можно сделать вывод о том, что для данного образца данного образца изоляционного материала и при данных параметрах моделируемой схемы амплитуда ЧР зависит от размеров дефекта. Данная зависимость особенно проявляется при напряжении выше 6 кВ, при начальных значениях питающего напряжения (3,3 кВ и ниже) зависимость амплитуды ЧР практически не заметна. Кроме того, наблюдается значительное увеличение амплитуды при значениях питающего напряжения выше 6,6 кВ. Характерная особенность объясняется тем, что изоляционный материал переходит в предпробойную стадию, для которой характерно резкое увеличение амплитуды ЧР. Данная особенность также была подтверждена другими исследователями, с использованием другого изоляционного материала, а также других размеров дефекта в изоляционном материале [6].

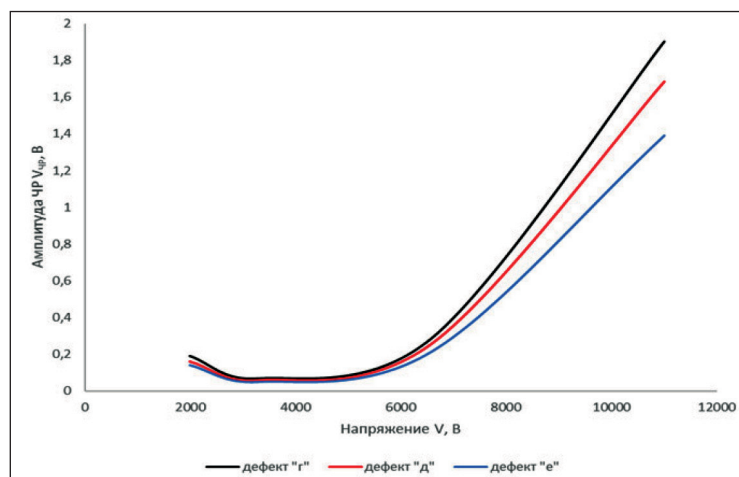


Рис. 8. Зависимость значения напряжения от амплитуды кажущегося заряда при разных дефектах

Заключение (Conclusion)

Частичные разряды являются основной проблемой в системе судового электрооборудования высокого напряжения, так как приводят к снижению допустимого уровня технического состояния изоляции и к короткому замыканию. Следовательно, обнаружение и измерение частичных разрядов необходимо для контроля технического состояния электрической изоляции и поддержания высоковольтного электрооборудования в работоспособном состоянии. В данной работе для моделирования частичных разрядов использовался сшитый полиэтилен как один из изоляционных материалов, применяемых в судовом высоковольтном электрооборудовании. На основе диэлектрической проницаемости и емкостей была построена модель изоляционного материала с газовым включением внутри изоляции разных размеров и площади. Обнаружено, что с увеличением приложенного напряжения и площади поперечного сечения газового включения в изоляции возрастает кажущийся заряд, являющийся одной из главных характеристик ЧР. Исходя из значения кажущегося заряда, можно определить среднее значение тока [13]. По этим двум параметрам можно оценить интенсивность ЧР. Показано, что наибольшая амплитуда частичных разрядов лежит в диапазоне от 6 кГц до 15 кГц. Также показано увеличение амплитуды частичного разряда при значении питающего напряжения выше 6,6 кВ, характерное при переходе изоляционного материала в предпробойную стадию. Однако следует также учитывать, что полученные в результате компьютерного моделирования данные, а именно: значение кажущегося заряда, амплитуда ЧР и его спектральное распределение, справедливы, если датчики обнаружения ЧР будут установлены в непосредственной близости от контролируемого оборудования. При осуществлении контроля ЧР посекционно необходимо также учитывать затухание импульса по мере его распространения. Решение данного вопроса требует усложнения модели и дополнительного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарагаев П. А. Частичные разряды в электрической изоляции / П. А. Тарагаев, К. А. Яновский // Вестник Морского государственного университета. — 2013. — № 58. — С. 94–97.
2. Vedral J. Signal processing in partial discharge measurement / J. Vedral, M. Kriz // Metrology and Measurement Systems. — 2010. — Vol. 17. — No. 1. — Pp. 55–64. DOI: 10.2478/v10178-010-006-8.
3. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 24 с.
4. Вдовенко В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В. П. Вдовенко. — Новосибирск: Наука, 2007. — 155 с.
5. Исмагилов Ф. Р. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика / Ф. Р. Исмагилов, Д. В. Максудов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2011. — Т. 15. — № 3 (43). — С. 98–100.
6. Stone G. C. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair / G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani. — John Wiley & Sons, 2004. — 390 p.
7. Wadhwa C. L. High voltage engineering / C. L. Wadhwa. — 2nd Edition. — New Age International, 2007. — 304 p.
8. ABB Technical Paper. Motors & Generators Optimized Cost of Ownership. — “ABB”, 2013. — 3 p.
9. General Recommendations for Cabling inboard ships. — “GE Energy”, 2013. — 27 p.
10. Sabat A. Simulation of Partial Discharge in High Voltage Power Equipment / A. Sabat, S. Karmakar // International Journal on Electrical engineering and Informatics. — 2011. — Vol. 3. — No. 2. — Pp. 234–247.
11. Kuffel E. High Voltage Engineering / E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel. — 2nd edition. — 2000. — 539 p.
12. Kattan P. I. Matlab for beginners / P. I. Kattan. — Petra books, 2012. — 212 p.
13. Кузнецов С. Е. Диагностирование изоляции судового высоковольтного электрооборудования в процессе эксплуатации / С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 183–190.

REFERENCES

1. Taragaev, P.A., and K.A. Yanovskii. "Chastichnye razryady v elektricheskoi izolyatsii." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 58 (2013): 94–97.
2. Vedral, Josef, and Martin Kriz. "Signal processing in partial discharge measurement." *Metrology and Measurement Systems* 17.1 (2010): 55–64. DOI: 10.2478/v10178-010-006-8
3. USSR. State Standard GOST 20074–83. Elektrooborudovanie i elektroustanovki. Metod izmereniya kharakteristik chastichnykh razryadov. M.: Izdatel'stvo standartov, 1983.
4. Vdovenko, V.P. *Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovol'nogo oborudovaniya*. Novosibirsk: Nauka, 2007.
5. Ismagilov, F.R., and D.V. Maksudov. "Mathematical modeling of partial discharges evolution in time of isolation degradation process." *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* 15.3(43) (2011): 98–100.
6. Stone, G.C., E.A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. John Wiley & Sons, 2004.
7. Wadhwa, C.L. *High voltage engineering*. 2nd Edition. New Age International, 2007.
8. *ABB Technical Paper. Motors & Generators Optimized Cost of Ownership*. "ABB", 2013.
9. *General Recommendations for Cabling inboard ships*. "GE Energy", 2013.- 27 p.
10. Sabat, Asima, and S. Karmakar. "Simulation of Partial Discharge in High Voltage Power Equipment." *International Journal on Electrical engineering and Informatics* 3.2 (2011): 234–247.
11. Kuffel, E., W.S. Zaengl, and J. Kuffel. *High Voltage Engineering*. 2nd edition. 2000
12. Kattan, Peter I. *Matlab for beginners*. Petra books, 2012.
13. Kuznetsov, S.E., and Yu.V. Kudryavtsev. "Diagnosis isolation of marine high-voltage electric equipment in operation." *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2016. 183–190.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Сергей Емельянович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: kuznecovse@gumrf.ru
Макаров Даниил Михайлович —
аспирант
Научный руководитель:
Кузнецов Сергей Емельянович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: daniil.makarov.think.tank@gmail.com,
kaf_saees@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Sergey Ye. —
Doctor of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: kuznecovse@gumrf.ru
Makarov, Daniil M. —
Postgraduate
Supervisor:
Kuznetsov, Sergey Ye.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: daniil.makarov.think.tank@gmail.com,
kaf_saees@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 8 мая 2018 г.
Received: May 8, 2018.