

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧАСТИЧНОГО РАЗРЯДА В КОМПЬЮТЕРНОЙ СРЕДЕ *MULTISIM*

А.М.БА БОРАИК, А.Е.УСАЧЕВ, А.Ю.КУБАРЕВ

Казанский государственный энергетический университет

В работе сообщается о результатах компьютерного моделирования частичных разрядов (ЧР) в изоляции в среде Multisim. Показывается, что величина изменения напряжения при ЧР и форма импульса разряда зависят от индуктивности между источником питания и объектом исследования.

Ключевые слова: частичные разряды, форма импульса ЧР, схема измерения ЧР, модель дефекта, индуктивность развязки.

Введение

Частичные разряды (ЧР) являются основной причиной необратимого ухудшения свойств (старения) изоляционных конструкций и приводят к уменьшению их срока службы. Контроль уровня ЧР в изоляции широко применяется в мировой практике эксплуатации электротехнического оборудования для обнаружения дефектов на ранних стадиях их развития и предотвращения аварийных ситуаций. Одной из основных характеристик ЧР при измерениях электрическими методами является величина «кажущегося разряда», численно равная произведению регистрируемого броска напряжения на ёмкость изоляции [1]. В настоящее время нет однозначного ответа на вопрос о степени корреляции между измеряемым броском напряжения при ЧР и характеристиками дефекта изоляции. При регистрации ЧР в виде затухающего колебательного процесса авторы работ [2, 3] часто не оговаривают, как определяется величина кажущегося заряда и какие характеристики процесса связаны с дефектом, а какие являются свойствами измерительной цепи. В данной работе, которая посвящена моделированию ЧР, показывается влияние индуктивности электрической цепи между источником напряжения и объектом испытания на величину измеряемого ЧР и его форму.

Для анализа влияния индуктивности на характеристики ЧР в изоляции в программной среде *Multisim* была использована схема, показанная на рис.1. Схема замещения дефекта основана на модели многослойной изоляции [1]. Вся изоляция представлена на схеме в виде столбца с дефектом и остальной бездефектной частью [2].

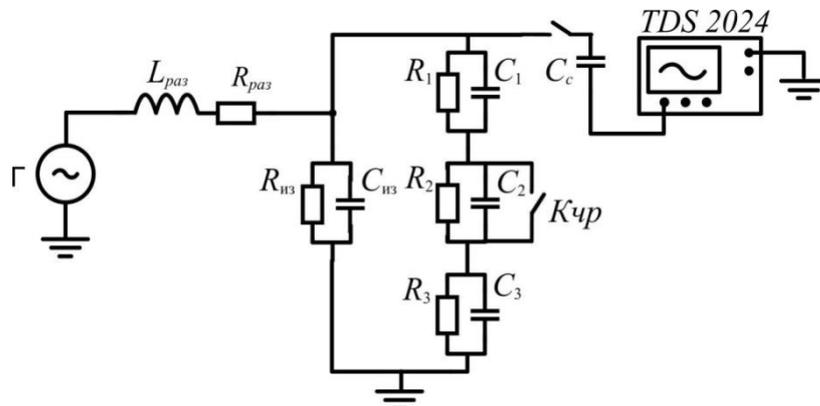


Рис.1.Схема моделирования изоляции с дефектом в среде *Multisim*

Активное сопротивление и ёмкость всей изоляции, за исключением столбца изоляции с поперечным сечением равным сечению дефекта, обозначены на рис. 1 символами $R_{из}$ и $C_{из}$. Активное сопротивление и ёмкость дефекта – R_2 и C_2 . Активное сопротивление и ёмкость части столбца над дефектом обозначены символами R_1 и C_1 , активное сопротивление и ёмкость столбца под дефектом – символами R_3 и C_3 . Символом Γ обозначен источник напряжения (сеть 50 Гц), $L_{раз}$ и $R_{раз}$ – обозначают индуктивность и активное сопротивление между источником напряжения и изоляцией с дефектом, *TDS 2024* - четырёхканальный осциллограф, на котором регистрируются ЧР через соединительный конденсатор C_c . Процесс ЧР моделировался замыканием и размыканием ключа $K_{чр}$.

Обычно для измерения ЧР используются две основные схемы [4]:

a – измерительное устройство присоединяется к датчику, которым, обычно, является высокочастотный трансформатор тока (*ТТ*), включаемый со стороны земли в цепь изоляция–земля, как показано на рис. 2, *a*; *б* – измерительное устройство присоединяется через соединительный конденсатор C_c к высоковольтному электроду изоляции, как показано на рис. 2, *б*.

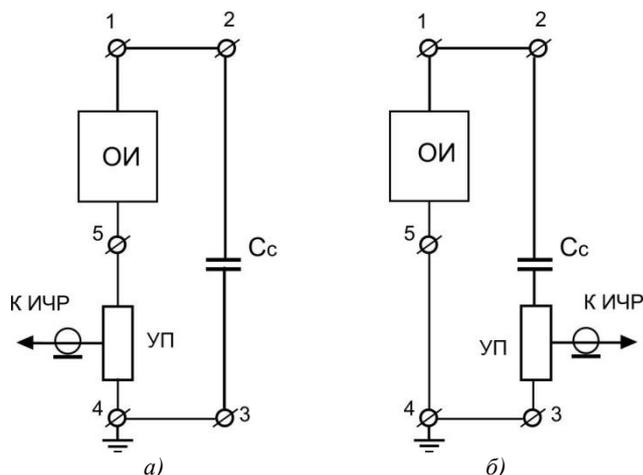


Рис. 2. Схемы регистрации ЧР [1]: ОИ – объект испытания; C_c – соединительный конденсатор; УП – устройство присоединения; ИЧР – измеритель ЧР

Моделирование частичных разрядов в данной работе проводилось по схеме рис.1, что соответствует измерениям ЧР по схеме рис. 2, *б*.

Для моделирования процесса ЧР в среде *Multisim* можно использовать не только функцию силового ключа, который замыкает часть изоляции, имитируя разряд в дефектной части, но и встроенные компоненты, такие как *Voltage suppressor V430MA7B*, *Spark_Plug*, *Varistor V275LA20A*, *SWICH* [3].

В данной работе при моделировании процесса частичного разряда использовалась встроенная функция ключа марки *SPST* ($K_{чр}$). Сопротивление при замкнутых контактах (включено) принималось равным $R_{on} = 100$ МОм, а сопротивление при разомкнутых контактах (отключено) $R_{off} = 100$ МОм. Величины сопротивлений R_{on} и R_{off} изменялись в зависимости от размера моделируемого дефекта. Процесс после разряда имитировался размыканием ключа. Такое отдельное моделирование двух стадий частичного разряда с помощью ключа имеет определённое преимущество перед другими встроенными компонентами *Multisim*, поскольку позволяет анализировать стадии ЧР отдельно друг от друга.

Индуктивность системы учитывалась вводом «индуктивности развязки» $L_{\text{раз}}$ между источником напряжения Γ и изоляцией объекта испытания с ЧР.

Если отсутствует развязка между источником питания и измеряемой изоляцией ($L_{\text{раз}} = 0$), то сигнал ЧР в схеме рис.1 (рис. 2, б) не наблюдается. При увеличении индуктивности развязки появляется сигнал ЧР с формой затухающих периодических колебаний. Частота колебаний определяется величинами индуктивностью развязки и ёмкостью изоляции ($L_{\text{раз}}$ и $C_{\text{из}}$). Скорость затухания (декремент затухания) колебательного процесса определяется в основном активным сопротивлением $R_{\text{раз}}$. По мере увеличения индуктивности $L_{\text{раз}}$ частота колебаний уменьшается, а амплитуда колебаний возрастает. Начиная с некоторой величины $L_{\text{раз}}$ возникает асимметрия колебательного процесса: амплитуда первого экстремума колебаний становится меньше амплитуды второго экстремума. Такое необычное поведение затухающих колебаний можно объяснить наложением какого-либо другого аperiодического сигнала. При дальнейшем увеличении $L_{\text{раз}}$ колебательный процесс становится неразличим на фоне увеличивающегося аperiодического сигнала. Амплитуда аperiодического сигнала нелинейно возрастает по мере увеличения $L_{\text{раз}}$, достигая насыщения при больших величинах индуктивности $L_{\text{раз}}$.

На рис.3 показаны модельные осциллограммы процессов при замыкании ключа $K_{\text{чр}}$ в схеме рис.1. Все осциллограммы получены при неизменных параметрах схемы (изоляция) за исключением индуктивности $L_{\text{раз}}$, которая изменялась от 0 до 1 Гн. Следует подчеркнуть, что моделируемый дефект оставался одним и тем же. Амплитуда броска напряжения возрастала от нуля до амплитуды насыщения, которая, в свою очередь, возрастала при увеличении величины дефекта. Из анализа приведённых на рис.3 осциллограмм можно сделать вывод, что амплитуда броска напряжения зависит не только от величины дефекта, но и от индуктивности $L_{\text{раз}}$ между объектом испытаний и источником напряжения. Получается, что величина измеряемого в электрических контактных методах кажущегося частичного разряда есть функция не только дефекта в изоляции, но и параметров измерительной цепи между источником питания и объектом измерения. Поскольку амплитуда колебательного процесса меньше амплитуды аperiодического сигнала, то возникает вопрос о том, можно ли вообще правильно измерить бросок напряжения при ЧР в этом случае? Колебательная форма ЧР наблюдалась и описывалась в ряде работ [6, 7, 8].

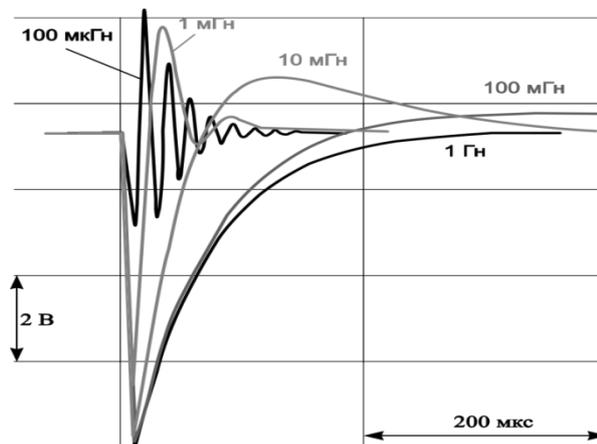


Рис. 3. Осциллограмма модельных частичных разрядов при различных значениях индуктивности между источником напряжения и объектом с ЧР

При изменении величины $L_{\text{раз}}$ от 100 до 1 мГн (рис.3) период колебательного процесса увеличивается, а время от начала ЧР до первого экстремума уменьшается. Амплитуда первого экстремума становится больше чем второго, но это различие амплитуд невозможно объяснить одной только постоянной времени затухающего процесса. Наложение аperiодического сигнала (ЧР) и периодического переходного процесса становится более наглядным. При дальнейшем увеличении $L_{\text{раз}}$ период колебательного процесса продолжает возрастать, амплитуда второго экстремума продолжает уменьшаться, а увеличения амплитуды первого экстремума постепенно замедляясь, прекращается при $L_{\text{раз}} > 1$ Гн. Зависимость амплитуды первого экстремума от величины $L_{\text{раз}}$ показаны на рис. 4.

Разные значения броска напряжения (амплитуды первого экстремума) и формы сигналов частичных разрядов при различных значениях $L_{\text{раз}}$, но одной и той же величине дефекта в изоляции, свидетельствуют о важности учета параметров развязки при измерении сигналов ЧР. Наблюдение колебательной формы сигнала ЧР свидетельствует о близости источника напряжения к испытываемому объекту и о сильном влиянии источника на сигнал ЧР. В этом случае становится не ясно, что следует принять за величину броска напряжения для определения величины кажущегося заряда: первый экстремум, второй экстремум или что-то ещё? Наблюдение аperiодической формы ЧР означает отдалённость источника напряжения от испытываемого объекта и говорит о слабом влиянии источника на сигнал ЧР, что позволяет использовать измеренную амплитуду для определения величины кажущегося ЧР с большей степенью достоверности. Эти моменты следует принимать во внимание при обработке и интерпретации результатов измерения ЧР контактными электрическими методами по схемам рис.2, б.

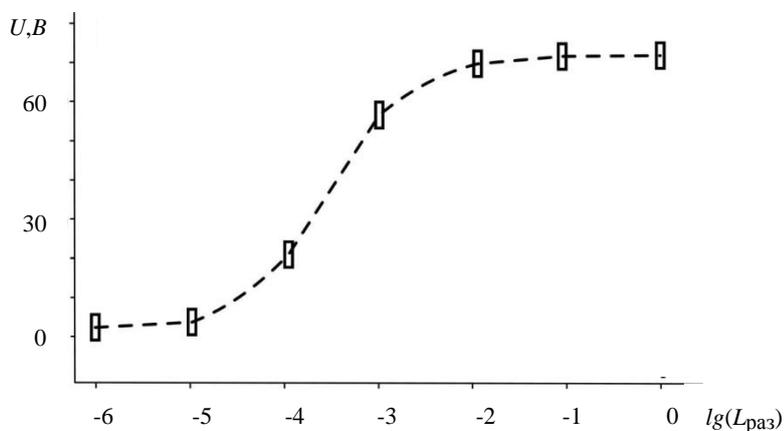


Рис. 4. Зависимость амплитуды ЧР в схеме рис.2б от индуктивности между источником напряжения и объектом с ЧР

Отметим, что амплитуда первого экстремума, зависимость которой показана на рис. 4, соответствует одной и той же величине дефекта с ЧР. Очевидно, что величина ЧР при малых $L_{\text{раз}}$ маскируется переходным процессом и трудно измерима. Сама амплитуда колебательного процесса напрямую не связана с величиной дефекта. Для достоверного определения амплитуды броска напряжения, связанного с ЧР из наблюдаемого переходного процесса нужно знать ёмкость объекта, параметры измерительного тракта и индуктивность системы в точке наблюдения ЧР. Даже при знании этих параметров выделение сигнала ЧР представляется сложной задачей.

Выводы:

1. Форма наблюдаемого ЧР является его важной характеристикой. Колебательная форма ЧР свидетельствует о сильном влиянии источника питания (слабой развязке между источником питания и измеряемой изоляцией) на измеряемую величину частичного разряда. Аperiodическая форма ЧР свидетельствует о слабом влиянии источника питания на результат измерения (сильной развязке между источником питания и измеряемой изоляцией).

2. Измеряемая величина броска напряжения при ЧР, из которой определяется значение «кажущегося разряда», сильно зависит от параметров развязки между источником напряжения и изоляцией, в которой наблюдаются частичные разряды. Измеряемая амплитуда ЧР, наблюдаемого от одного и того же дефекта при слабой и сильной развязке, может отличаться на порядок.

Summary

The paper reports the results of computer simulation process emergence of partial discharge (PD) in insulation defects in different types of Multisim environment. It is shown that the oscillatory nature of the transition processes in partial discharges depends on the value of inductance between the power source and the object of study.

Keywords: partial discharge, PD pulse shape, measuring circuit partial discharge, the defect model, decoupling inductance.

Литература

1. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007.155 с.
2. Nenad Kartalovi'c, Dragan Kova'cevi'c, and Srdan Milosavljevic - An Advanced Model of Partial Discharge in Electrical Insulation- /FACTA UNIVERSITATIS (NI'S) SER.: ELEC. ENERG. vol. 24, no. 1, April 2011, 41-55.
3. National Instruments: NI Discussion Forums [Электронныйресурс]. Режим доступа:www.ni.com.(Дата обращения: 14.04.2015).
4. ГОСТ 20074-83 Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. М: Из-во стандарты, 2008.
5. Кубарев А.Ю., Усачев А.Е. Моделирование дефектов в бумажно-пропитанной изоляции кабельных линий распределительных сетей среднего напряжения. // Энергетика Татарстана. 2011. №2(22). С.52 – 55.
6. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К. Метод селекции сигнала ЧР с помощью вейвлет-преобразования// Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 2. С. 99 — 104.
7. Ермаков Е.Г., Монастырский А.Е. О проблемах применения электрического метода регистрации частичных разрядов для диагностики высоковольтных силовых трансформаторов // Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы. Екатеринбург: Автограф, 2010. С. 39–48.
8. Муратов В.И., Куценко С.М.Об отклике измерительной системы при регистрации частичных разрядов / В.И. Муратов, С.М. Куценко // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2009. N 4. С. 200–202.

Поступила в редакцию

30 сентября 2016

г.

Ба Бораик Абдулрахман Мохаммед – магистр техники и технологии, аспирант кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843)519-42-70, 8(904)6614843.E-mail: baboraik_4@mail.ru.

Кубарев Артём Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843)519-42-70, 8(950)3119630.E-mail: artemkubarev@yandex.ru.

©Проблемы энергетики. 2016. № 9-10

Усачев Александр Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843)519-42-70, 8(950)312-42-99. E-mail:aleksandr_usachev@rambler.ru.