

УДК 621.315.6

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.139942

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Троценко Е. А., Бржезицкий В. А., Проценко А. Р., Чумак В. В., Гаран Я. А.

### 1. Введение

Измерение характеристик частичных разрядов является одним из основных методов неразрушающего контроля и оценки состояния изоляции оборудования высокого напряжения. Диагностика состояния изоляции методом измерения частичных разрядов требует применения специальных технических средств. Для измерения характеристик и определения мест возникновения частичных разрядов в изоляции оборудования высокого напряжения применяются различные системы измерения частичных разрядов. Для визуального наблюдения результатов измерений могут использоваться как аналоговые или цифровые осциллографы, так и осциллограф, реализованный программно на внешнем персональном компьютере (как правило, ноутбук). Для связи детектора частичных разрядов с внешним персональным компьютером может быть использован интерфейс USB. Вопросы измерения характеристик частичных разрядов имеют большое значение для подготовки студентов и специалистов, работающих в области диагностики изоляции электрооборудования. В то же время, не в каждой высоковольтной лаборатории есть стенды по исследованию частичных разрядов. Поэтому, построение схемотехнической модели, способной дать качественное представление о функционировании системы измерения характеристик частичных разрядов, является актуальной задачей.

### 2. Объект исследования и его технологический аудит

*Объектом исследования* является система обнаружения частичных разрядов в образце изоляции оборудования высокого напряжения. Частичные разряды представляют большую опасность для изоляции электрооборудования высокого напряжения, вследствие их разрушительного действия. Для оценки технического состояния изоляции электрооборудования разработаны и продолжают совершенствоваться различные методы обнаружения частичных разрядов. Роль моделирования, виртуального эксперимента и виртуальных лабораторных работ в последнее время возрастает во всех областях технических наук. Вместе с тем, отдельные аспекты моделирования электрических систем обнаружения частичных разрядов, практически рассмотрены не достаточно. Моделирование является важным дополнительным видом практической подготовки к последующей работе с измерительным и испытательным оборудованием в профессиональной деятельности.

### **3. Цель и задачи исследования**

*Целью исследования* является определение возможности использования в исследованиях и учебном процессе в качестве аналога системы измерения характеристик частичных разрядов эквивалентной схемотехнической модели.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Создание экспериментального стенда для физического моделирования частичных разрядов в образце высоковольтной изоляции и анализ результатов, полученных экспериментально.

2. Схемотехническое моделирование системы обнаружения частичных разрядов и определение возможности модели качественно воспроизводить результаты физического эксперимента.

### **4. Исследование существующих решений проблемы**

В настоящее время разработаны различные методы обнаружения частичных разрядов в различных видах электрооборудования. Краткая история и анализ возможностей различных методов представлены в [1]. Благодаря высокой чувствительности метода и возможности всестороннего изучения характеристик частичных разрядов, широкое распространение получил электрический метод обнаружения частичных разрядов [1]. Структура электрической схемы измерения характеристик частичных разрядов может изменяться в зависимости от цели измерения и вида контроля состояния изоляции. Обзор [2] показывает, что практически все современные системы измерения частичных разрядов используют два основных типа схем обнаружения частичных разрядов: прямую и балансную. Для исследования в данной работе выбрана прямая схема, которая является более простой в реализации. В настоящее время для исследования частичных разрядов диэлектрика с газовым включением при воздействии различного напряжения широко используется трёх-емкостная схема замещения, которая появилась в результате усовершенствований схемы из работы [3]. Критический анализ этой схемы, а также краткий перечень внесённых в схему изменений представлен в [4]. В [5] показано одно из последних усовершенствований схемы (параллельное соединение нескольких трёх-емкостных схем замещения при исследовании разряда в промежутке с однородным полем). Обзор способов моделирования схем замещения диэлектрика с газовым включением при частичном разряде с помощью демонстрационной версии Micro-Cap Evaluation/Student Version [6] дан в [7, 8]. Моделирование одного варианта системы измерения частичных разрядов проведено в работах [9, 10]. В работе [11] показаны результат моделирования нескольких различных схем измерения частичных разрядов.

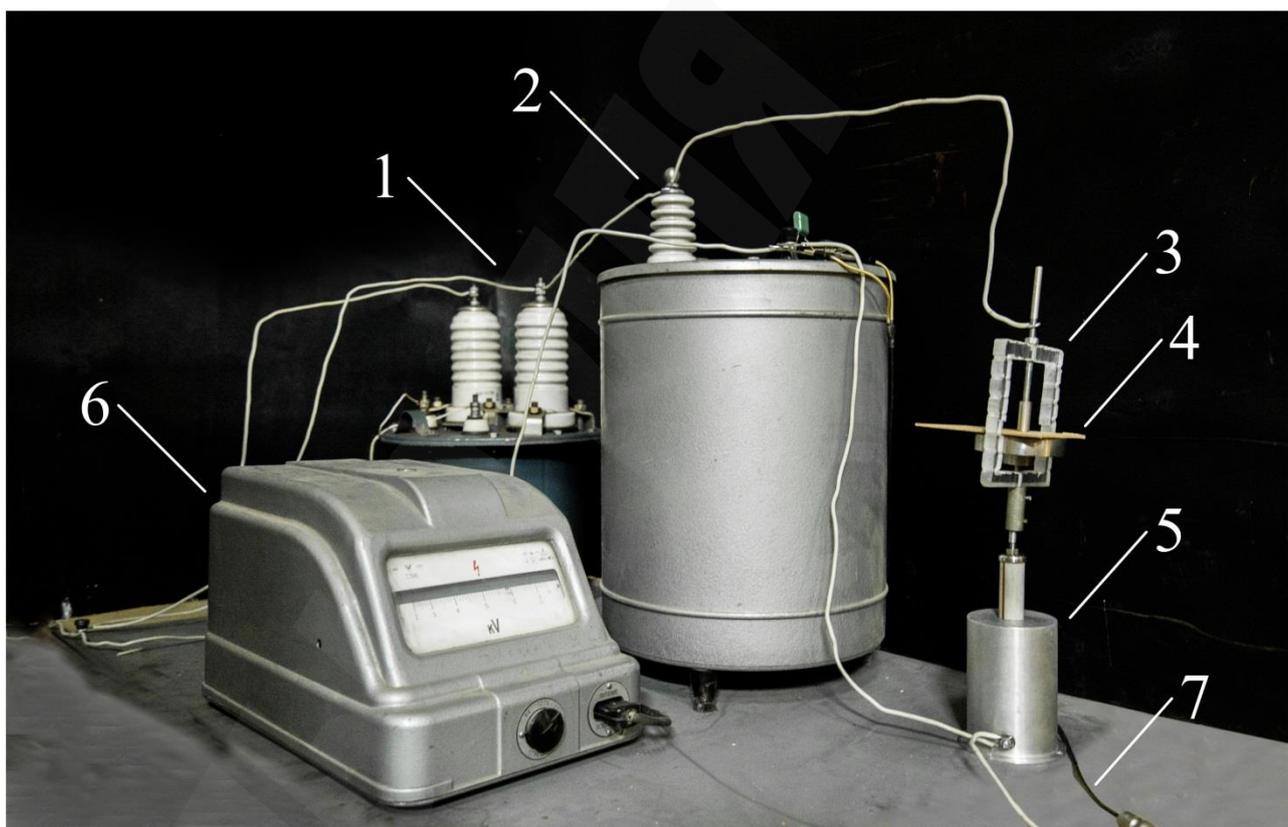
Отличительной особенностью данной работы является то, что авторами проведено сопоставление результатов комплексного физического и схемотехнического моделирования частичных разрядов.

## 5. Методы исследований

Для проведения исследования были использованы методы: физического моделирования, электрический метод обнаружения частичных разрядов с приложением высокого напряжения, схмотехнического моделирования на персональном компьютере. Основными материалами исследования являются результаты, полученные на экспериментальной установке для измерения характеристик частичных разрядов и её схмотехнической модели.

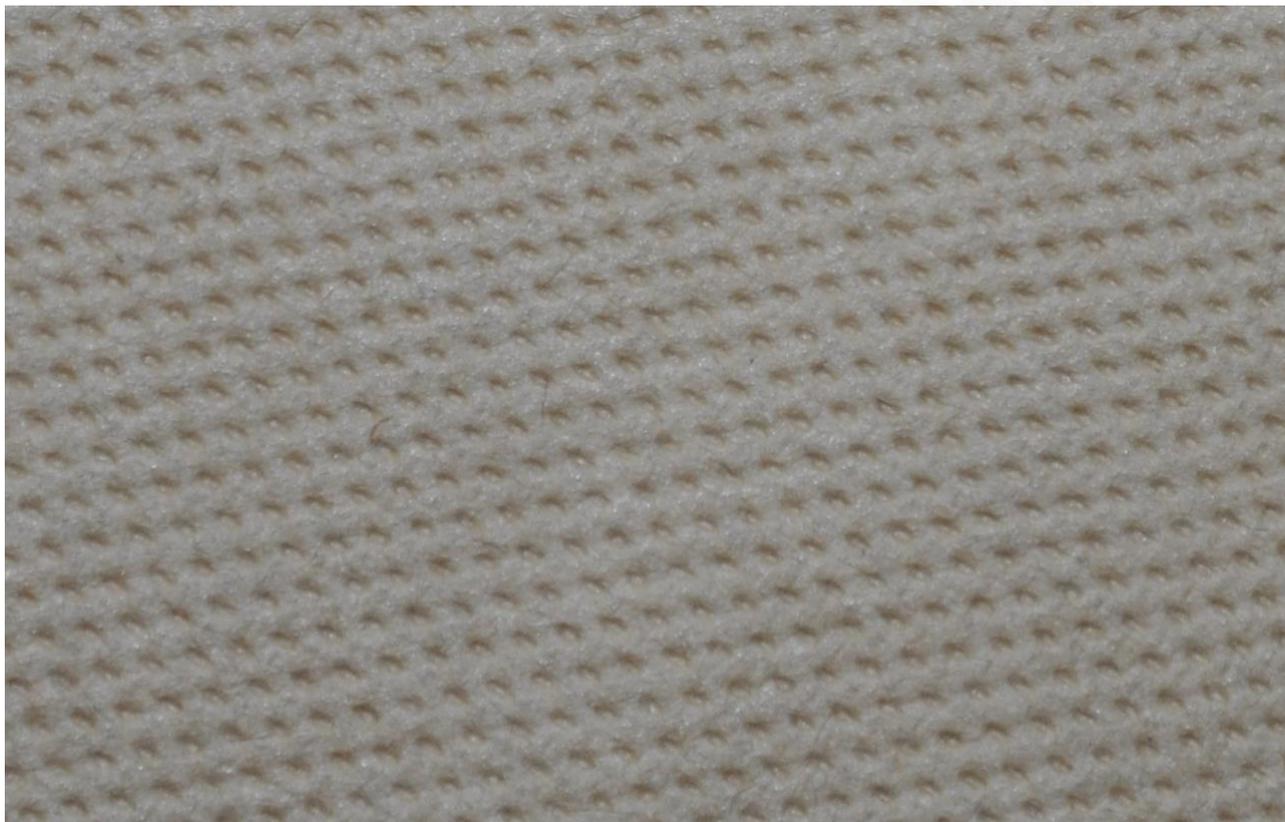
## 6. Результаты исследований

Для исследований на кафедре техники и электрофизики высоких напряжений Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» была собрана экспериментальная установка, высоковольтная часть которой показана на рис. 1. Как было отмечено выше, эта схема соответствует прямому методу обнаружения частичных разрядов. Принцип действия этой схемы неоднократно описан в различной литературе [1, 2], и поэтому здесь рассматриваться не будет.



**Рис. 1.** Фотография экспериментальной установки для измерения характеристик частичных разрядов: 1 – повышающий трансформатор; 2 – соединительный конденсатор; 3 – объект измерения; 4 – электротехнический картон (элемент объекта измерения); 5 – экран фильтра верхних частот; 6 – киловольтметр; 7 – кабель для присоединения к усилителю и осциллографу

Объект физического моделирования частичных разрядов представляет собой межэлектродный промежуток, состоящий из двух соосных цилиндрических электродов с электротехническим картоном толщиной 2,3 мм между ними. Внешние поверхности электротехнического картона содержат многочисленные воздушные полости, показанные на рис. 2. Цилиндрические электроды имеют разные диаметры (10 мм и 70 мм). Высокое напряжение приложено к верхнему цилиндрическому электроду меньшего диаметра. Частичные разряды возникают в области с наибольшей напряженностью поля – в воздушных полостях в картоне возле верхнего электрода.



**Рис. 2.** Полости на поверхности электротехнического картона (расстояние между полостями на фотографии 1 мм)

Для регистрации импульсов частичных разрядов использовался цифровой осциллограф PC-OSCILLOSCOPE, модель ISDS220B (производитель фирма INSTRUSTAR, Китай). Связь осциллографа с персональным компьютером осуществлялась через USB-интерфейс.

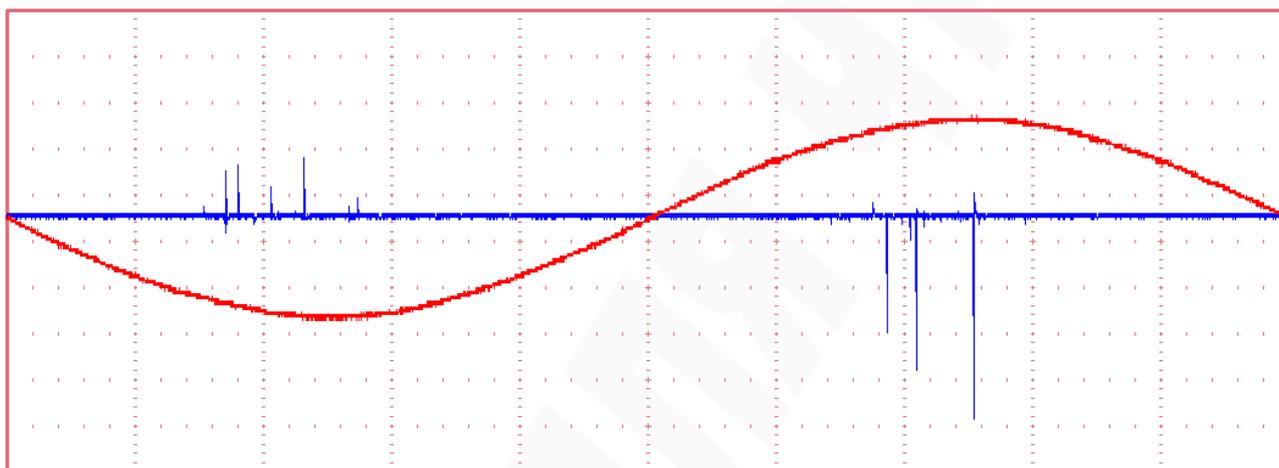
В соответствии с ГОСТ 20074 [12], который соответствует Европейскому стандарту IEC 60270 [13] была проведена градуировка регистрирующего прибора (осциллографа) в полностью собранной испытательной установке при присоединённом объекте испытаний импульсами напряжения, получаемыми от градуировочного генератора. В результате проведенной градуировки было получено значение градуировочного коэффициента  $K_q = 2.57$  пКл/В. С помощью коэффициента  $K_q$  можно рассчитывать кажущийся заряд  $q$  частичных разрядов по формуле (ГОСТ 20074):

$$q = K_q \cdot A_q,$$

где  $A_q$  – показание (в вольтах) пика импульса частичного разряда на экране осциллографа.

Полученное значение градуировочного коэффициента действительно для данной испытательной установки и зависит от значений параметров всех её элементов, а также схемы их соединения (по ГОСТ 20074).

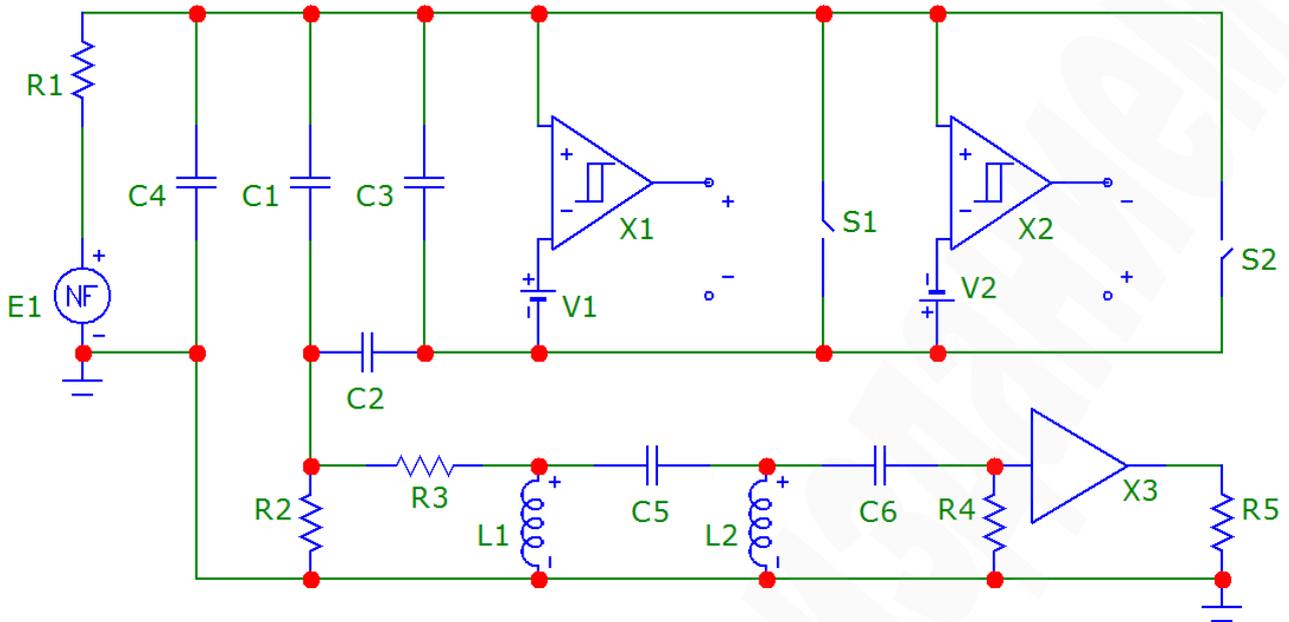
Пример полученной осциллограммы показан на рис. 3. При этом синим цветом показаны зарегистрированные импульсы частичных разрядов, а красным цветом показано напряжение частоты 50 Гц, приложенное к изоляционному промежутку (амплитудное значение 3 кВ).



**Рис. 3.** Осциллограмма частичных разрядов, полученных в физическом эксперименте при частоте 50 Гц

Как видно на рис. 3, в изоляционном промежутке возникают импульсы частичных разрядов разной амплитуды. Кроме того, полученная осциллограмма демонстрирует эффект полярности. В частности, в различные полупериоды синусоиды воздействующего напряжения, частота следования импульсов частичных разрядов, а также амплитудные значения импульсов частичных разрядов значительно отличаются. Приведенная осциллограмма относится к случаю, когда воздушные включения, подвергаемые электрическому пробую, находятся в области высоковольтного электрода. Продемонстрированные в физическом эксперименте особенности частичных разрядов следует учитывать при разработке схмотехнической модели системы измерения их характеристик.

Схмотехническая модель, предложенная авторами, показана на рис. 4.



**Рис. 4.** Моделирование системы обнаружения частичных разрядов

На рис. 4  $E_1$  – источник высокого напряжения частотой 50 Гц;  $R_1$  – внутреннее сопротивление источника высокого напряжения. Элементы  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $C_5$  и  $C_6$  представляют собой фильтр верхних частот (фильтр Баттерворта 4-го порядка). Данный фильтр пропускает высокие частоты входного сигнала (импульсы частичных разрядов), при этом подавляются низкие частоты сигнала (напряжение частотой 50 Гц). Электрический метод обнаружения частичных разрядов чувствителен к разного рода помехам, поэтому для защиты от них фильтр помещён в экран (рис. 1). С выхода фильтра напряжение поступает на вход широкополосного усилителя  $X_3$ , а с его выхода – на осциллограф. Входное сопротивление цифрового осциллографа представлено резистором  $R_5$ . Элементы  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $S_1$  и  $S_2$  моделируют дефектный участок (полость с газовым включением в твердой изоляции у поверхности высоковольтного электрода). Назначение двух этих групп элементов детально описано в [7, 8]. Конденсатор  $C_1 = 2$  пФ представляет собой ёмкость диэлектрика, без участка с газовым включением, конденсатор  $C_3 = 0.05$  пФ представляют собой ёмкость газового включения; а конденсатор  $C_2 = 2$  пФ – ёмкость участка диэлектрика, включенного последовательно с газовым включением.

Некоторое затруднение вызывает расчёт ёмкости газового включения. В существующих подходах к решению этой задачи, например, принимают, что газовая полость имеет сферическую форму [14]. В рассматриваемом случае, как это видно из рис. 2, форма полости близка к полусфере. Поэтому, приближенно, ёмкость включения можно определить по формуле для ёмкости полусферы вблизи плоской границы двух сред (когда диаметральная плоскость полусферы совпадает с границей раздела) [15]:

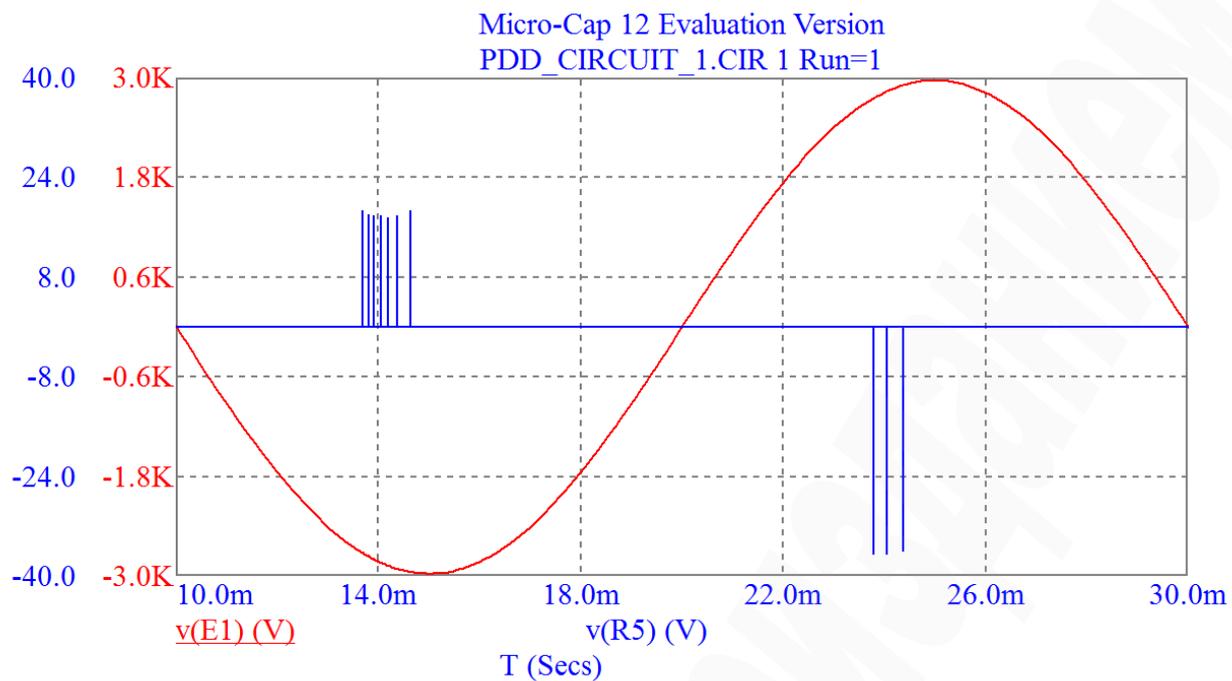
$$C_3 = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \varepsilon_0 (\varepsilon_{r2} + 0.69\varepsilon_{r1}), \quad (1)$$

где  $a$  – радиус полусферы, м;  $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $\varepsilon_{r1} = 1$  – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха; относительная  $\varepsilon_{r2} = 2.5$  – диэлектрическая проницаемость электротехнического картона [16]. Для  $a = 0.25 \cdot 10^{-3}$  м по формуле (1) получим, что  $C_3 = 0.044$  пФ. Округлив, окончательно примем, что  $C_3 = 0.05$  пФ.

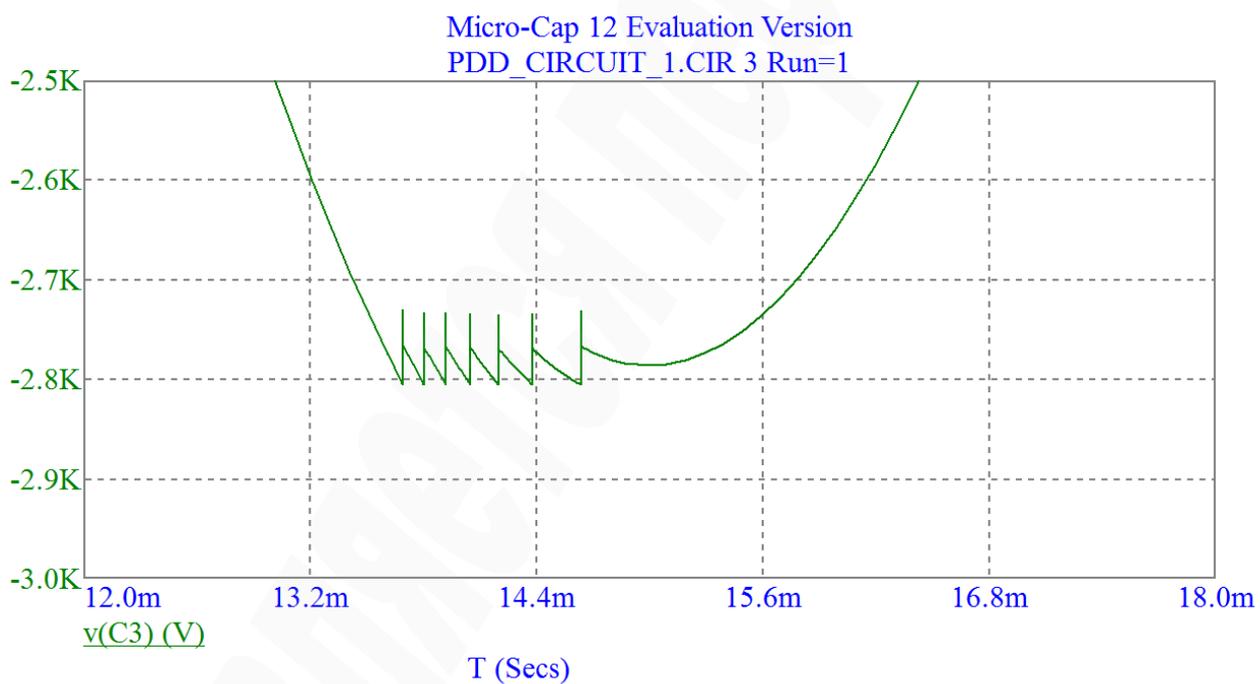
Ёмкость участка диэлектрика, включенного последовательно с газовым включением, также определяется приближённо. Поскольку глубина воздушных полостей (рис. 2) значительно меньше толщины электротехнического картона, а также с учётом того, что поры находятся не внутри, а на поверхности картона, выше было принято, что  $C_2 \approx C_1 = 2$  пФ.

Моделирование было выполнено при следующих значениях остальных параметров:  $R_1 = 1$  Ом;  $R_2 = R_3 = R_4 = 500$  Ом;  $R_5 = 1$  МОм;  $C_5 = 172$  пФ;  $C_6 = 415$  пФ;  $L_1 = 104$  мГн;  $L_2 = 43$  мГн. Сопротивление ключей  $S_1, S_2, S_3, S_4$  в разомкнутом состоянии равно  $1 \cdot 10^{20}$  Ом, а в замкнутом равно 100 Ом. Параметры элементов  $V_1, V_2$ , и  $X_1, X_2$  задают значения пробивного напряжения частичного разряда и напряжения погасания частичного разряда газового включения для различных полярностей приложенного напряжения [7, 8].

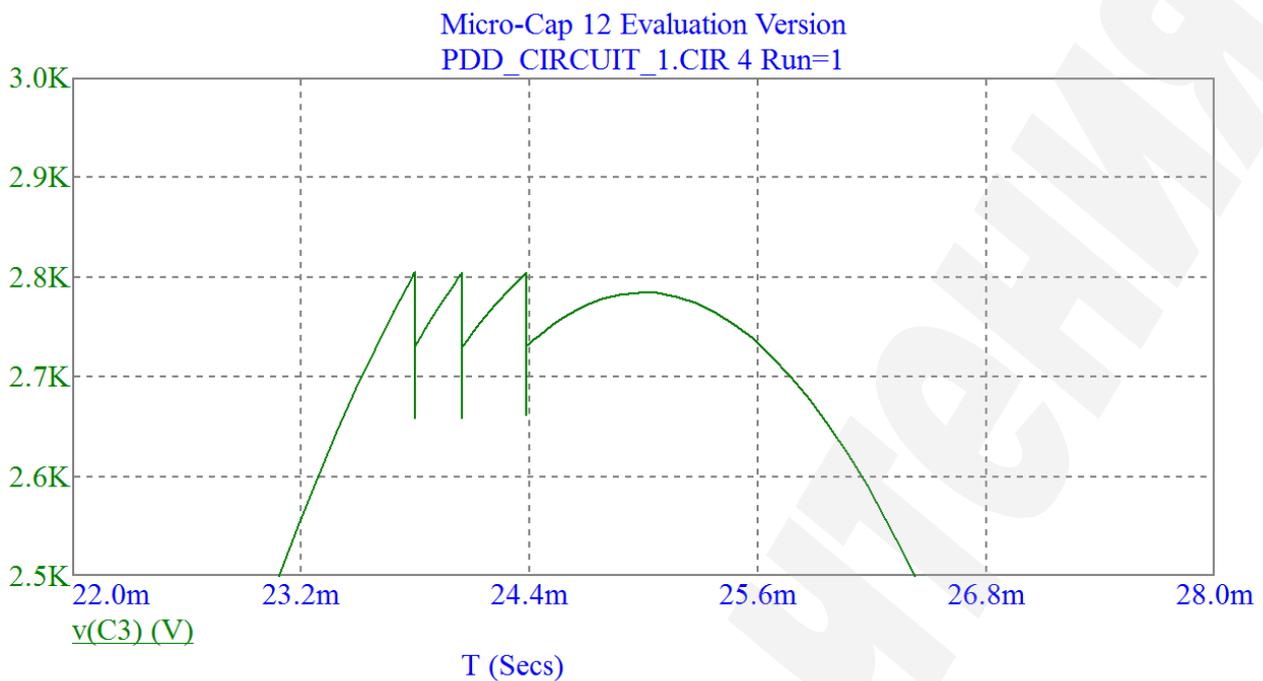
В работе пробивное напряжение воздушного включения при частичном разряде принято равным +2.81 кВ для положительного полупериода и –2.81 кВ для отрицательного полупериода. Напряжение погасания частичного разряда было принято равным +2.67 кВ для положительного полупериода и –2.75 кВ для отрицательного полупериода. Рис. 5 показывает, что при выборе данных значений параметров при моделировании можно достичь результатов, качественно близких к наблюдаемым в физическом эксперименте (рис. 3). На рис. 5 кривая синего цвета соответствует высокому напряжению, которое приложено к объекту испытания. Кривая красного цвета соответствует напряжению, которое возникает на входе осциллографа. На рис. 6 и рис. 7 отдельно показаны графики напряжения, которое возникает, непосредственно, на воздушной полости, соответственно, в отрицательный и положительный полупериоды.



**Рис. 5.** Частичные разряды, полученные в виртуальном эксперименте при частоте 50 Гц

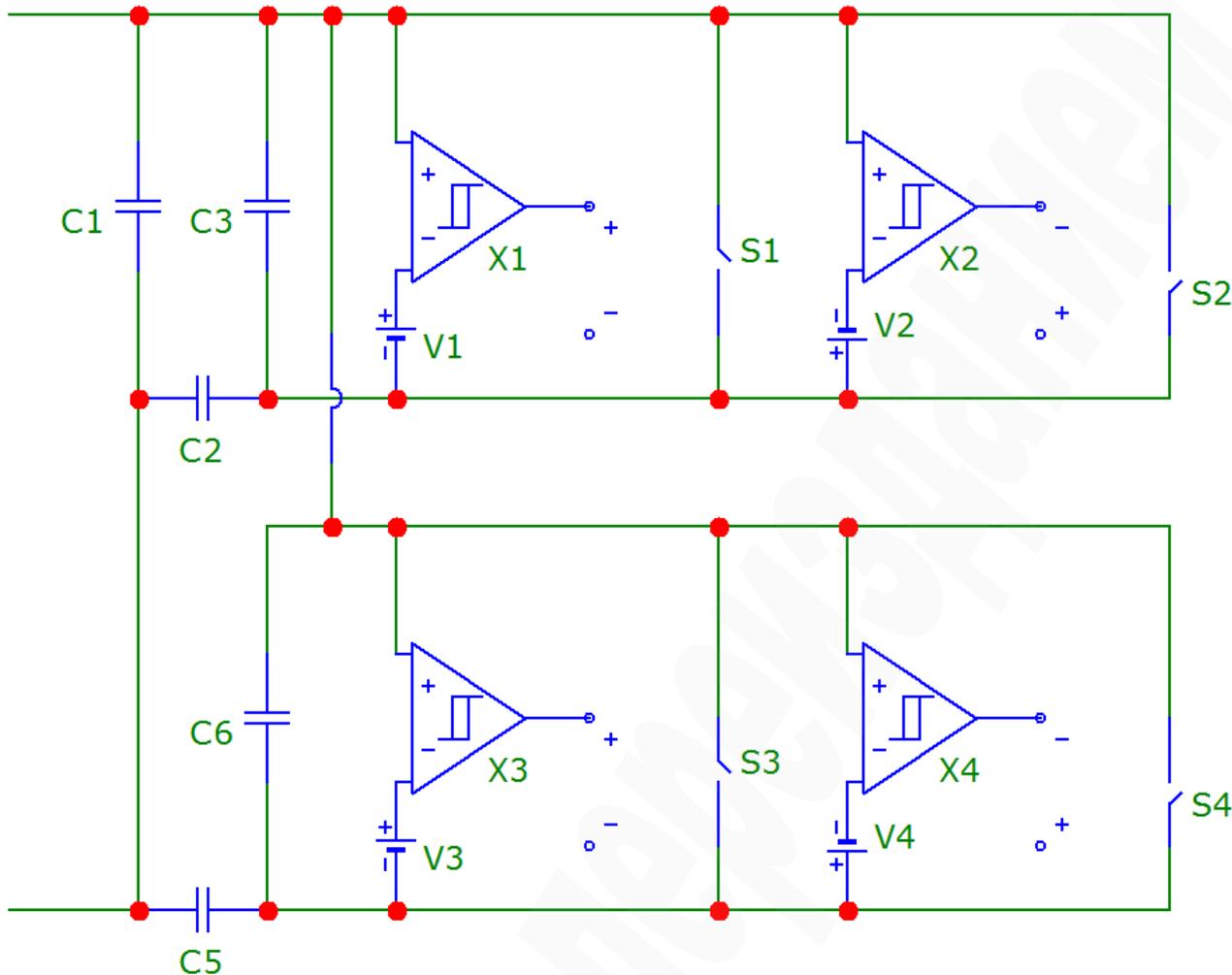


**Рис. 6.** Напряжение на газовом включении в отрицательный полупериод напряжения



**Рис. 7.** Напряжение на газовом включении в положительный полупериод напряжения

В приведенном выше примере моделирования, было использовано только одно газовое включение. В физическом эксперименте площадь верхнего электрода покрывает несколько газовых полостей. Соответственно при воздействии высокого напряжения, частичные разряды могут возникать в различных газовых полостях. Увеличение количества газовых включений в модели, учёт статистического разброса характеристик частичных разрядов будет способствовать приближению результатов виртуального эксперимента к реальному. Для объекта испытания, рассмотренного в данной работе, трёх-емкостные схемы замещения диэлектрика с газовыми включениями можно соединять параллельно, как показано на рис. 8.



**Рис. 8.** Пример модели диэлектрика с двумя газовыми полостями

Определение параметров такой модели требует дальнейших исследований.

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

*Strengths.* Сильными сторонами данного исследования являются:

- в отличие от других исследований, наряду со схемотехническим моделированием было выполнено физическое моделирование частичных разрядов в изоляционном промежутке;
- физический эксперимент позволил определить, какие особенности процесса частичных разрядов должна воспроизводить схемотехническая модель;
- подтверждена потенциальная возможность использования в исследованиях и учебном процессе вместо реальной системы измерения характеристик частичных разрядов эквивалентной схемотехнической модели.

*Weaknesses.* Слабая сторона данного исследования состоит в том, что:

- при схемотехническом моделировании была использована демонстрационная версия программного обеспечения, которая не позволяет создавать сложные электрические схемы. Для максимального приближения результатов виртуального эксперимента к физическому необходимо использовать профессиональное программное обеспечение.

*Opportunities.* К дополнительным возможностям, которые предоставляет данное исследование, относится:

- полученные результаты косвенно подтверждают широкие возможности, которые может дать усовершенствование традиционной трёх-ёмкостной схемы диэлектрика с газовым включением при частичном разряде;
- продолжение исследований по созданию и расширению возможностей виртуальных и демонстрационных лабораторных работ в области электроэнергетики.

*Threats.* Отдельной сложной задачей является определение размеров газовых полостей, их положения в твердом диэлектрике, а также напряжения пробоя и напряжения погасания частичных разрядов в этих полостях. Существуют попытки решению этой задачи. Например, принимают, что газовая полость имеет сферическую форму [14]. Однако дефекты в реальной изоляции гораздо сложнее. Поэтому проведенное моделирование частичных разрядов можно охарактеризовать как приближённое.

## **8. Выводы**

1. Для измерения характеристик частичных разрядов в образцах высоковольтной изоляции был собран демонстрационный экспериментальный стенд. Стенд позволяет проводить испытания приложением высокого напряжения переменного тока. Для визуализации отдельных импульсов частичных разрядов на осциллографе был рассчитан и изготовлен фильтр низких частот, который подавляет напряжение основной частоты 50 Гц. Данный фильтр представляет собой фильтр Баттерворта 4-го порядка. Проведено осциллографирование импульсов частичных разрядов, которые возникают у высоковольтного электрода в изоляционном промежутке с электротехническим картоном. Экспериментально установлено, что в изоляционном промежутке возникают импульсы частичных разрядов разной амплитуды при ярко выраженном эффекте полярности. Экспериментальная осциллограмма была принята как образец, к которому должна приближаться осциллограмма при моделировании.

2. Проведено схемотехническое моделирование собранной системы обнаружения частичных разрядов. Для моделирования образца изоляции с частичным разрядом использована приближённая схема замещения. Первоначально принято, что в изоляции присутствует одна газовая полость с частичным разрядом, при этом электрическая схема изоляции представлена традиционной трёх-ёмкостной схемой замещения диэлектрика с газовым включением. В результате исследований установлено, что при моделировании возможно получить результаты, качественно близкие к наблюдаемым в физическом эксперименте. Показана возможность моделирования частичных разрядов в диэлектрике при наличии двух и более газовых включений. Продемонстрирована возможность доступной реализации физической и виртуальной системы для исследования такого сложного явления, как частичные разряды в диэлектрике.

## Литература

1. Vdoviko V. P. Chastichnye razriady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniia. Novosibirsk: Nauka, 2007. 155 p.
2. Gulski E. Digital analysis of partial discharges // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2, Issue 5. P. 822–837. doi: <http://doi.org/10.1109/94.469977>
3. Gemant A., Philippoff W. Die Funkenstrecke mit Vorkondensator // Zeitschrift für Technische Physik. 1932. Vol. 13, Issue 9. P. 425–430.
4. Lemke E. A critical review of partial-discharge models // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2012. Vol. 28, Issue 6. P. 11–16. doi: <http://doi.org/10.1109/mei.2012.6340519>
5. Partial discharge characteristics of uniform gap in oil-impregnated paper insulation under switching impulse voltage / Deng J. et. al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2016. Vol. 23, Issue 6. P. 3584–3592. doi: <http://doi.org/10.1109/tdei.2016.005508>
6. Micro-Cap 11. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual. Sunnyvale: Spectrum Software, 2014. 1040 p. URL: <http://www.spectrum-soft.com/download/rm11.pdf>
7. Simulation of partial discharges under influence of impulse voltage / Trotsenko Y. et. al. // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 1, Issue 1 (39). P. 36–41. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.123309>
8. Effect of voltage harmonics on pulse repetition rate of partial discharges / Trotsenko Y. et. al. // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 2, Issue 1 (40). P. 37–44. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.126626>
9. A Matlab Simulink model for a partial discharge measuring system / Gunawardana S. D. M. S. et al. // Electrical Engineering Conference. 2015. P. 29–34.
10. Pahomov A. I. Metody i sredstva diagnostiki izoliatsii asinhronnykh dvigatelei sel'skohoziastvennogo proizvodstva na osnove chastichnykh razriadov: Abstract of Doctor of Technical Sciences Thesis. Krasnodar, 2005. 32 p.
11. Development of partial discharge model, simulation and measurement / Kolev N. P. et. al. // 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Austin, 1999. P. 214–217. doi: <http://doi.org/10.1109/ceidp.1999.804629>
12. GOST 20074-83. Elektrooborudovaniye i elektroustanovki. Metod izmereniya kharakteristik chastichnykh razryadov. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1983. 22 p.
13. IEC 60270:2000. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. Geneva: IEC Central Office, 2000. 99 p.
14. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L. Modelling of Partial Discharge Activity in Different Spherical Cavity Sizes and Locations within a Dielectric Insulation Material // Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Harbin, 2009. P. 485–488. doi: <http://doi.org/10.1109/icpadm.2009.5252384>
15. Iossel' Yu. Ya., Kochanov E. S., Strunskiy M. G. Raschet elektricheskoy emkosti. Leningrad: Energoizdat, 1981. 288 p.
16. Makarov E. F. Spravochnik po elektricheskim setyam 0.4-35 kV. Vol. 1. / ed. by Goryunov I. T., Lyubimova A. A. Moscow: Papirus Pro, 1999. 608 p.