

УДК 621.315.6

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.123309

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ПРИ ВЛИЯНИИ ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

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

1. Введение

Частичные разряды в изоляции электрооборудования высокого напряжения постепенно приводят к ухудшению свойств изоляции, её физическому разрушению и, в конечном итоге, к пробое. Кроме этого, частичные разряды могут приводить и к перекрытию изоляции. Например, частичные разряды в одном изоляторе могут приводить к перекрытию всей гирлянды изоляторов [1].

Согласно ГОСТ 20074, частичный разряд представляет собой электрический разряд, который шунтирует часть изоляции между электродами, находящимися под разными потенциалами. На практике, частичные разряды представляют собой локальные электрические пробои ослабленных участков твердой изоляции, например газовых полостей (или включений жидкого диэлектрика в твердой изоляции).

Наличие частичных разрядов в электрооборудовании высокого напряжения свидетельствует о внутренних дефектах его изоляции. Поэтому согласно действующим стандартам электрооборудование подвергается испытаниям с измерением частичных разрядов.

Кроме переменного напряжения различной частоты, частичные разряды измеряют также при затухающем переменном напряжении и напряжении постоянного тока [2]. Как будет показано далее, авторы статьи считают целесообразным переходить к измерениям частичных разрядов и при испытаниях приложенным импульсным напряжением.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом исследования являются схема замещения диэлектрика с ослабленным (например, с газовым) включением при частичном разряде. Испытание с измерением частичных разрядов приложением переменного напряжения является одним из основных методов диагностики и неразрушающих испытаний. Для регистрации характеристик частичных разрядов применяется специальная аппаратура с программным обеспечением для обработки результатов измерений [2], как правило, при некотором установившемся переменном напряжении. В зависимости от состояния изоляции, на переменном напряжении интенсивность частичных разрядов может быть не значительной, в то время как при импульсных напряжениях, их интенсивность должна резко возрастать.

Следует отметить, что согласно ГОСТ 1516.2, приложение импульсного испытательного напряжения не обязательно завершается пробоем изоляции

электрооборудования или же отсутствием пробоя. Может иметь место частичный пробой изоляции, при котором будет повреждена не вся изоляция электрооборудования, а только некоторый её объем. Обнаружить такое повреждение в соответствии с ГОСТ 1516.2 достаточно сложно, но регистрация частичных разрядов позволит это выявить по увеличению их интенсивности.

Использование для поставленной задачи существующих технических средств, предназначенных для измерения характеристик частичных разрядов на переменном напряжении не приемлемо. Поэтому предварительно необходимо провести компьютерное моделирование частичных разрядов при воздействии импульсного напряжения.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является анализ процесса частичного разряда в изоляции при воздействии импульсного напряжения в программах схемотехнического моделирования. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Создание компьютерной модели диэлектрика с газовым включением при частичном разряде.
2. Определение работоспособности и применимости модели при воздействии переменного напряжения.
3. Исследование на модели частичных разрядов при воздействии импульсного напряжения и формулирование выводов.

4. Исследование существующих решений проблемы

Работа [3] считается первой публикацией, посвященной моделированию частичных разрядов в изоляции с газовым включением. В этой же работе представлена ёмкостная схема замещения диэлектрика с газовым включением. Краткая история дальнейших модификаций ёмкостной схемы замещения диэлектрика с газовым включением при частичном разряде дана в [4].

В работах [5, 6] показано, что присутствие высших гармоник напряжения может приводить к увеличению интенсивности частичных разрядов.

В работах [7–9] показано, что при воздействии импульсов напряжения в образцах изоляции возникает значительное количество импульсов частичных разрядов. Воздействию импульсного напряжения подвергалось не электроэнергетическое оборудование, а отдельные образцы изоляции: пленка [7], пропитанная маслом бумага [8], гель [9]. В целом работы [7–9] опровергают утверждение [10], согласно которому при воздействии импульсного напряжения образуется один-два частичных разряда. В работе [8] показано, что при воздействии коммутационных импульсов напряжения возникают сотни частичных разрядов.

В целом, в области моделирования частичных разрядов на переменном напряжении с помощью программ схемотехнического моделирования достигнуты большие результаты. В работах [11, 12] помимо всего прочего, с разной степенью детализации также выполнено моделирование и системы измерения частичных разрядов.

Таким образом, результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что вопросы моделирования частичных разрядов в изоляции электрооборудования при воздействии импульсного напряжения изучены ещё не достаточно.

5. Методы исследований

Для решения поставленных задач были использованы методы схемотехнического моделирования на персональном компьютере. Основным материалом исследований являются ёмкостная схема замещения диэлектрика с газовым включением при частичном разряде.

6. Результаты исследований

Схемы для определения формы частичных разрядов на газовом включении при воздействии различного напряжения показаны на рис. 1. Эти схемы соответствуют традиционному подходу для изучения частичных разрядов [3, 13]. Моделирование выполнено в демонстрационной версии Micro-Cap Evaluation/Student Version [14].

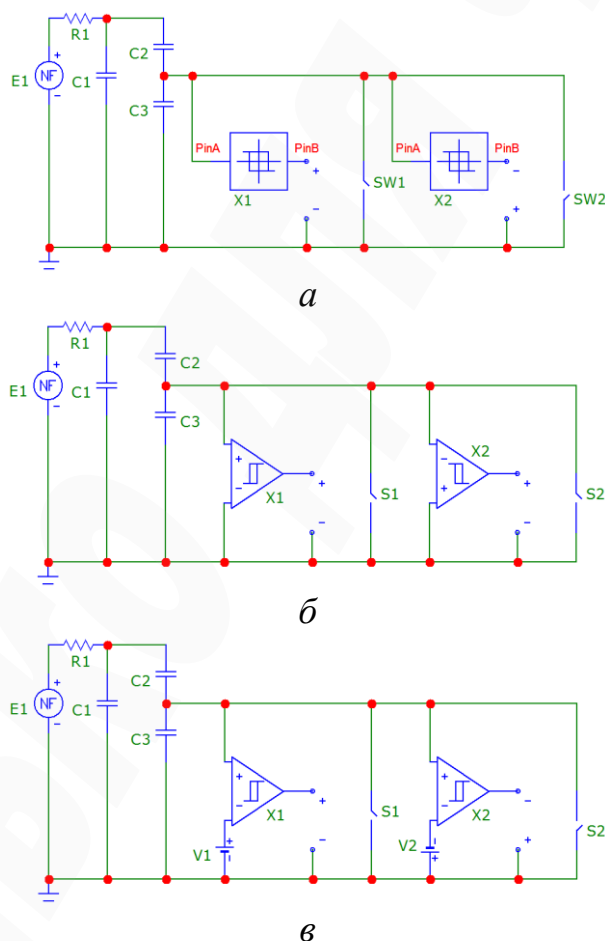


Рис. 1. Моделирование диэлектрика с газовым включением при частичном разряде с использованием: *a* – триггера Шмитта и ключа, управляемого напряжением; *б* – компаратора напряжения с гистерезисом и ключа, управляемого напряжением с гистерезисом; *в* – компаратора напряжения с гистерезисом и ключа, управляемого напряжением с гистерезисом, а также источника опорного напряжения

На рис. 1 E_1 – функциональный источник напряжения; R_1 – внутреннее сопротивление источника напряжения; C_1 – ёмкость диэлектрика, без участка с газовым включением; C_2 – ёмкость участка диэлектрика, включенного последовательно с газовым включением; C_3 – ёмкость газового включения. Остальные элементы моделируют разрядник, имитирующий пробой газового включения. Эти элементы перечислены ниже.

На рис. 1, а X_1, X_2 – триггеры Шмитта; SW_1, SW_2 – ключи, управляемые напряжением.

На рис. 1, б, в X_1, X_2 – компараторы напряжения с гистерезисом; S_1, S_2 – ключи, управляемые напряжением с гистерезисом.

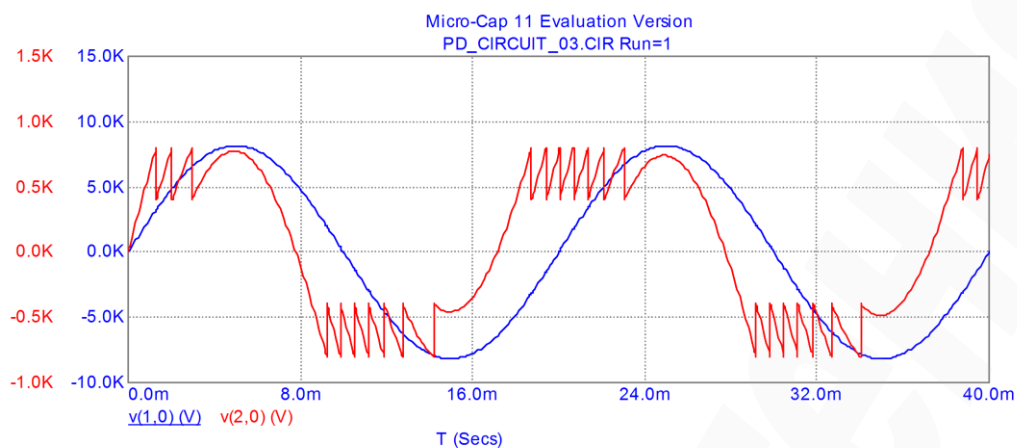
На рис. 1, в V_1, V_2 – источники опорного напряжения. В схемах принято, что сопротивление ключей SW_1, SW_2, S_1 и S_2 в разомкнутом состоянии составляет 100 МОм, а в замкнутом 1 Ом. Внутреннее сопротивление источника напряжения составляет 1 Ом.

Схемы на рис. 1 отображают различные подходы к схемотехническому моделированию пробоя. В частности, схема на рис. 1, а соответствует подходу, предложенному в [12], а схема, на рис. 1, б, в соответствуют подходу, предложенному в [15, 16]. Все графики, которые будут показаны ниже, получены на модели, изображенной на рис. 1, в.

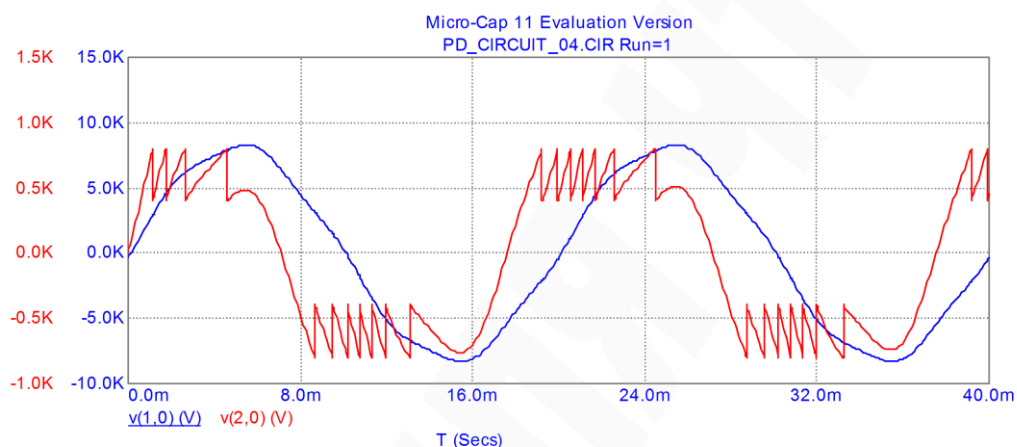
Перед исследованием воздействия импульсного напряжения на модель изоляции с газовым включением было проведено тестирование модели с использованием переменного напряжения, результаты которого показаны на рис. 2. Отметим, что результаты показаны на одном графике, но с разными масштабами по вертикальной оси. Синим цветом показаны кривые напряжения, приложенного к диэлектрику. Красным цветом показаны кривые напряжения на газовом включении в твердой изоляции.

Рис. 2, а соответствует приложению только основной гармоники напряжения амплитудой $10000 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}$ В. Это соответствует случаю неискаженной кривой напряжения. На практике очень часто имеют место несинусоидальные режимы. Рис. 2, б, в соответствуют присутствию, помимо основной, также 5-й гармонической составляющей напряжения, амплитуда которой составляет 4,0 % от основной гармоники. Фазовый сдвиг 5-й гармоники на рис. 2, б составляет $\frac{270}{180} \pi$ рад, а на рис. 2, в, соответственно,

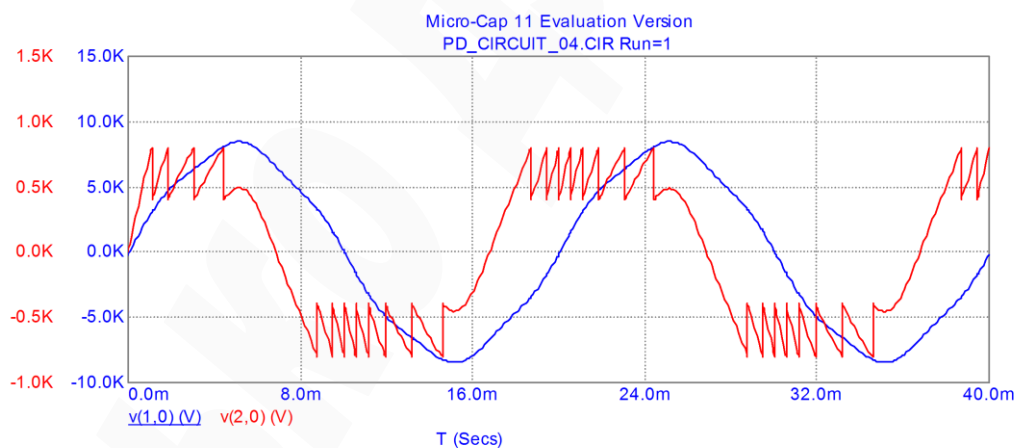
$\frac{330}{180} \pi$ рад.



a



б



в

Рис. 2. Воздействие переменного напряжения на диэлектрик с газовым включением при частичном разряде: *a* – воздействие основной (1-й) гармоники напряжения; *б* – воздействие 1-й и 5-й гармоник напряжения без увеличения интенсивности частичных разрядов; *в* – воздействие 1-й и 5-й гармоник напряжения с увеличением интенсивности частичных разрядов

Кривые на рис. 2 показывают, что модели на рис. 1 воспроизводят заданные пользователем значения пробивного напряжения частичного разряда (+800 В) и напряжения погасания частичного разряда (+400 В). Соответственно,

для отрицательного полупериода синусоиды эти значения составляют -800 В и -400 В. Расчёты выполнены для $C_1 = 5000$ пФ; $C_2 = 200$ пФ и $C_3 = 600$ пФ. Графики на рис. 1, а соответствуют традиционному виду кривой напряжения на газовом включении при частичном разряде [13].

Кривые на рис. 2, б, в показывают, что даже небольшой уровень нелинейных искажений напряжения влияет на форму частичных разрядов. Кроме того, при определенных значениях фазового сдвига гармоник может увеличиваться интенсивность частичных разрядов. Например, на рис. 2, а, б присутствует 14 частичных разрядов за один период, а на рис. 2, в имеем уже 16 частичных разрядов за один период. Таким образом, на модели получены результаты, которые соответствуют утверждению [5, 6] о влиянии нелинейных искажений на увеличение интенсивности частичных разрядов.

Для тестирования модели импульсным напряжением был использован полный грозовой импульс амплитудой 75 кВ формой 1,2/50 мкс. Согласно ГОСТ 1516.3 такой импульс используется для испытания изоляции электрооборудования класса 10 кВ. Для описания такого импульса было использовано выражение [17]:

$$E_1 = 1,044 \cdot 75000 \cdot \left(e^{-1.400 \cdot 10^4 \cdot t} - e^{-1.917 \cdot 10^6 \cdot t} \right). \quad (1)$$

Результаты воздействия импульса напряжения (1) на объект показаны на рис. 3. Как и раньше, синим цветом показана кривая приложенного к диэлектрику напряжения. Красным цветом показана кривая напряжения на газовом включении в твердой изоляции.

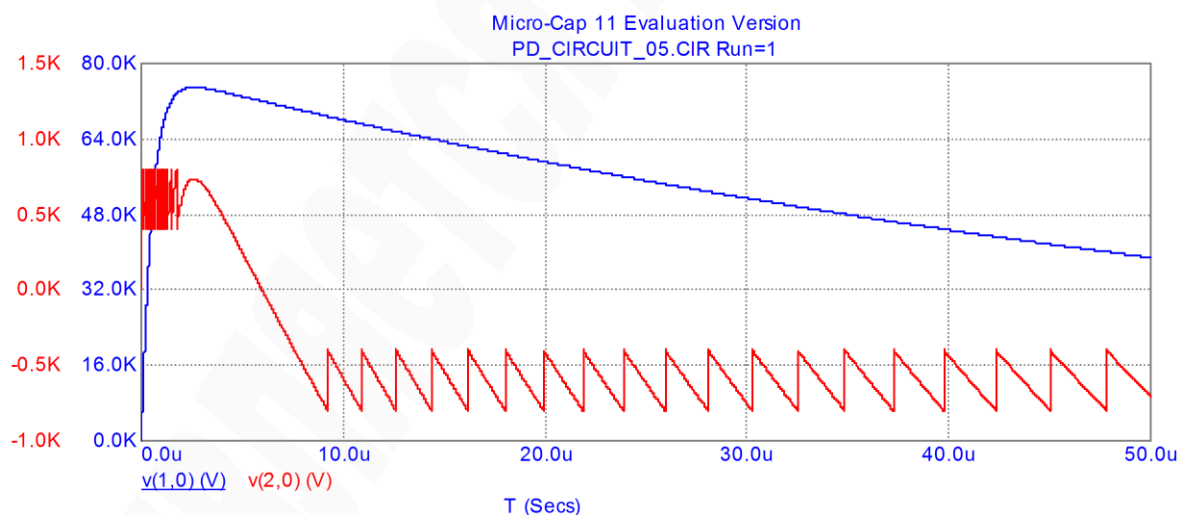


Рис. 3. Воздействие грозового импульса напряжения на диэлектрик с газовым включением при частичном разряде

Рис. 3 показывает, что в газовом включении частичные разряды возникают как на фронте импульса, так и на его спаде. Количество частичных разрядов весьма значительно для отображения их всех на одном графике. На рис. 4

отдельно в увеличенном масштабе показаны частичные разряды, которые соответствуют фронту приложенного импульса, а на рис. 5, соответственно, показаны частичные разряды, которые соответствуют спаду импульса.

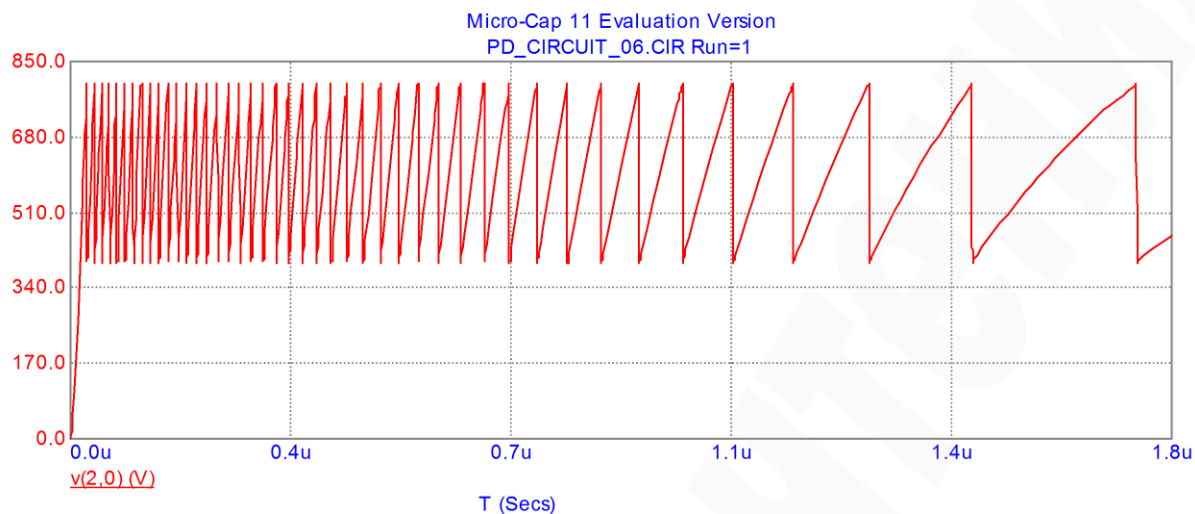


Рис. 4. Частичные разряды (область фронта импульса)

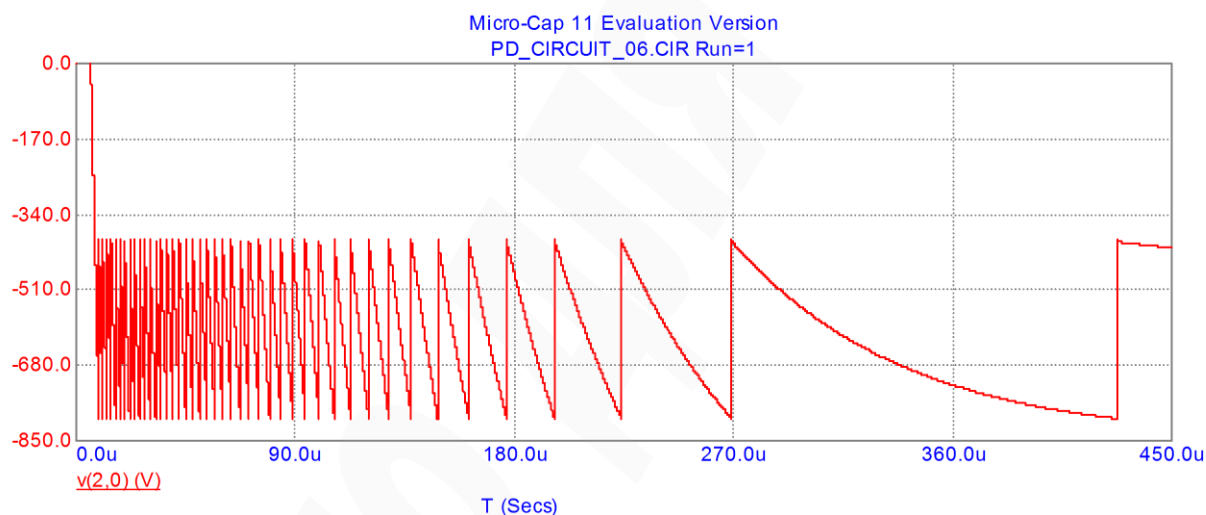


Рис. 5. Частичные разряды (область спада импульса)

Как видно из рис. 3–5, на фронте импульса возникают частичные разряды положительной полярности, а на спаде – отрицательной полярности. При этом грозовой импульс, приложенный к изоляции, имеет положительную полярность.

При амплитуде приложенного импульса 75 кВ количество частичных разрядов как на фронте (рис. 4), так и на спаде (рис. 5) импульса составляет 44. При снижении амплитуды приложенного импульса напряжения количество частичных разрядов снижается. Например, при амплитуде приложенного импульса 50 кВ имеем 29 частичных разрядов на фронте и 28 импульсов на спаде.

Таким образом, на модели получены результаты, в которых показано, что при воздействии импульсов напряжения в образцах изоляции резко возрастает

интенсивность частичных разрядов, как в области фронта, так и спада импульса, что аналогично работам [7, 8].

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Сильными сторонами данного исследования являются:

- возможность моделирования явления частичного разряда с помощью программ схемотехнического моделирования. Это очень важно, поскольку в отличие от виртуального эксперимента физический эксперимент требует наличия высоковольтной лаборатории, дорогого оборудования и большого штата квалифицированного персонала;

- в отличие от других исследований, предложенный подход позволит расширить возможности диагностики состояния изоляции при помощи частичных разрядов.

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

- точное количество, геометрические размеры газовых полостей и их положение в твердом диэлектрике не известны. Фактические значения емкостей в трёх-емкостной схеме замещения диэлектрика с газовым включением, соответственно тоже не известны. Поэтому модели могут быть использованы скорее для качественной, а не количественной оценки частичных разрядов под воздействием импульсного напряжения.

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

- возможность дальнейшего усовершенствования модели, включая учёт влияния увлажнения изоляции, наличия нескольких газовых включений и других факторов или особенностей;

- возможность оптимизировать экспериментальную работу в высоковольтной лаборатории, предварительно определив на моделях дальнейший план экспериментов.

Threats. Результаты, получаемые на моделях, всегда только приближаются к результатам реального физического эксперимента. Ввиду сложности явления, часть особенностей модель не учитывает. Например, это относится к статистическому разбросу характеристик и формы включений в изоляции.

8. Выводы

1. Создана схемотехническая модель диэлектрика с газовым включением при частичном разряде. Модель включает в себя три ёмкости: C_1 – ёмкость диэлектрика, без участка с газовым включением; C_2 – ёмкость участка диэлектрика, включенного последовательно с газовым включением; C_3 – ёмкость газового включения. Показано, как с помощью сочетания различных элементов выполнить имитацию пробоя газового включения.

2. Проверена работоспособность модели при воздействии переменного напряжения. Установлено, что модель воспроизводит поведение реального диэлектрика с газовым включением при частичных разрядах под воздействием переменного напряжения. Кривые напряжения на газовом включении

воспроизводят задаваемые пользователем значения пробивного напряжения частичного разряда и напряжения погасания частичного разряда. Кроме того, было подтверждено, что нелинейные искажения напряжения приводят к возрастанию количества частичных разрядов.

3. Проведено исследование модели при воздействии на неё полного грозового импульса напряжения. В результате установлено, что в газовом включении частичные разряды возникают как на фронте импульса, так и на его спаде, причем, в значительном количестве. Это позволяет утверждать, что диагностика состояния изоляции с использованием измерения характеристик частичных разрядов при воздействии импульсного напряжения будет более информативной. В частности, она позволит обнаруживать частичные пробои изоляции, возникающие при импульсных испытаниях и отсутствующие при стандартных испытаниях переменным напряжением. Для проведения таких измерений необходимы разработки новых методик, оборудования и диагностических процедур.

Литература

1. A Study of the Causes of Electric Overlapping of the Middle Phase Insulator String of the Overhead Power Line / Brzhezitsky V. O. et al. // Research Bulletin of National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». 2011. Vol. 6. P. 36–41.

2. Eigner A., Rethmeier K. An overview on the current status of partial discharge measurements on AC high voltage cable accessories // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2016. Vol. 32, No. 2. P. 48–55. doi:[10.1109/mei.2016.7414231](https://doi.org/10.1109/mei.2016.7414231)

3. Gemant A., Philippoff W. Die Funkenstrecke mit Vorkondensator // Zeitschrift für Technische Physik. 1932. Vol. 13, No. 9. P. 425–430.

4. Lemke E. A critical review of partial-discharge models // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2012. Vol. 28, No. 6. P. 11–16. doi:[10.1109/mei.2012.6340519](https://doi.org/10.1109/mei.2012.6340519)

5. Florkowski M., Florkowska B. Distortion of partial-discharge images caused by high-voltage harmonics // IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution. 2006. Vol. 153, No. 2. P. 171–180. doi:[10.1049/ip-gtd:20050008](https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20050008)

6. Impact of high voltage harmonics on interpretation of partial discharge patterns / Florkowski M. et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. Vol. 20, No. 6. P. 2009–2016. doi:[10.1109/tdei.2013.6678848](https://doi.org/10.1109/tdei.2013.6678848)

7. Partial discharge characteristics of oil/polypropylene film with a needle-plate electrode excited by impulse voltages / Li Y. et al. // 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2013. P. 1225–1228. doi:[10.1109/ceidp.2013.6748256](https://doi.org/10.1109/ceidp.2013.6748256)

8. 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, No. 6. P. 3584–3592. doi:[10.1109/tdei.2016.005508](https://doi.org/10.1109/tdei.2016.005508)

9. Do T., Lesaint O., Auge J.-L. Streamers and partial discharge mechanisms in silicone gel under impulse and AC voltages // IEEE Transactions on Dielectrics and

Electrical Insulation. 2008. Vol. 15, No. 6. P. 1526–1534.
doi:[10.1109/tdei.2008.4712654](https://doi.org/10.1109/tdei.2008.4712654)

10. Vdoviko V. P. Chastichnye razriady v diagnostirovanii vysokovol'nogo oborudovaniia. Novosibirsk: Nauka, 2007. 155 p.

11. A Matlab Simulink Model for a Partial Discharge Measuring System / Gunawardana S. D. M. S. et al. // 2015 Electrical Engineering Conference (EECon). 2015. P. 29–34.

12. Pahomov A. I. Metody i sredstva diagnostiki izoliatsii asinhronnyh dvigatelei sel'skohoziastvennogo proizvodstva na osnove chastichnyh razriadov: Thesis Abstract of Doctor of Technical Sciences: 05.20.02. Krasnodar, 2005. 32 p.

13. Hochspannungstechnik: Theoretische und praktische Grundlagen / Beyer M. et al. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1986. 362 p. doi:[10.1007/978-3-642-61633-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61633-4)

14. Micro-Cap 11. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual. Sunnyvale, CA: Spectrum Software, 2014. 1040 p. URL: <http://www.spectrum-soft.com/download/rm11.pdf>

15. Trotsenko Y., Brzhezitsky V., Masluchenko I. Circuit simulation of electrical breakdown in air using Kind's equal-area criterion // Technology audit and production reserves. 2017. Vol. 3, No. 1 (35). P. 44–49. doi:[10.15587/2312-8372.2017.102240](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.102240)

16. Babicheva A. A., Protsenko O. R., Trotsenko Ye. O. Modeliuvannia proboiu izoliatsiinoho promizhku iz zadanoi volt-sekundnoi kharakterystykoiu // Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv «Suchasni problemy elektroenerhotekhniky ta avtomatyky». 2016. P. 357–359.

17. Brzhezitsky V., Trotsenko Y., Haran Y. Analysis and comparison of metal-oxide surge arrester models // Technology audit and production reserves. 2017. Vol. 6, No. 1 (38). P. 40–46.