

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.3.048

Диагностика частичных разрядов в изоляционных материалах распределительных сетей и способы их моделирования

А.Э. Богачев, М.А. Антонов

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

По статистике, каждая вторая авария в энергосистеме связана с повреждением изоляции. В большинстве случаев этому виной физическое старение или разрушение оболочек силовых кабельных линий, а также производственный брак. Еще одной причиной являются частичные разряды (ЧР) в изоляции [1]. Частичные разряды представляют собой незначительные явления, происходящие в дефектах и износе изоляционных материалов. Для изучения и последующего решения проблемы, связанной с выходом из строя изоляции, применяется компьютерное моделирование кабельных линий. Цель данной статьи заключается в анализе программных комплексов с проведением экспериментов по созданию моделей кабельных линий, что позволит наглядно продемонстрировать пагубное влияние частичных разрядов на изоляцию.

Ключевые слова: частичные разряды, изоляционный материал, кабельная линия, моделирование

Для цитирования: Богачев А.Э., Антонов М.А. Диагностика частичных разрядов в изоляционных материалах распределительных сетей и способы их моделирования. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(5):5–8.

Detecting Partial Discharges in Insulating Materials of Power Distribution Networks and Methods for Modeling Thereof

Aleksandr E. Bogachev, Mikhail A. Antonov

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

According to statistics, every second power system failure is caused by insulation defects. They mostly result from the physical wear or destruction of the power cable sheaths, as well as from manufacturing defects. Another cause is presence of partial discharges (PD) in insulation [1]. Partial discharges are minor phenomena occurring within the areas of defects and wear of insulating materials. Computer modeling of cable lines is used to study and subsequently address the problem of insulation failure. The article aims at analysing the software packages to conduct experiments on creating cable line models to enable clear demonstration of the detrimental effects of PD on insulation.

Keywords: partial discharges, insulating material, cable line, modeling

For Citation: Bogachev AE, Antonov MA. Detecting Partial Discharges in Insulating Materials of Power Distribution Networks and Methods for Modeling Thereof. *Young Researcher of Don*. 2025;10(5):5–8.

Введение. Частичные разряды (ЧР) вызывают негативные изменения в диэлектриках, где они возникают, поскольку на них воздействуют разряды, что приводит к химическому разложению [1]. Таким образом, ЧР становятся основным механизмом ухудшения изоляции. Мы делим на прошлое (начальное состояние) и настоящее (текущее состояние) состояния изоляционной конструкции по уровню и интенсивности ЧР, которые варьируются от начальных (новая изоляция) до критических, образующихся в условиях пробоя изоляции. Между вышеупомянутыми состояниями существуют аспекты, такие как уровень и интенсивность ЧР, которые определяют нормальные условия функционирования изоляции.

Частичный разряд представляет собой локальное электрическое явление с пониженной энергетической интенсивностью, сосредоточенное на ограниченном участке изоляционного пространства, при этом не наблюдается значительных изменений разности потенциалов между электродами.

Основная часть. Эмпирические данные показывают, что возникновение частичных разрядов в диэлектрической среде обусловлено наличием внутренних неоднородностей структуры (газовые включения, микроскопические твердые примеси). В качестве физиологической причины данного явления можно рассматривать формирование локальных неоднородностей в распределении электрического поля, когда величина напряженности в области дефекта значительно превышает аналогичный параметр в объеме изоляционного материала [2].

Развитие ЧР в кабельной линии ведет к возникновению пробоя изоляционного материала и, как следствие, к нарушению электроснабжения потребителей. Поэтому прогнозирование пробоя и превентивная замена участков кабельной линии становятся актуальными задачами обеспечения надежного электроснабжения.

Рассмотрим целесообразность имитационного моделирования электрических сетей, с особым акцентом на кабельные линии передач [3]. Имитационные модели, реализованные в специализированном программном обеспечении, обеспечивают визуализацию функционирования проектируемого участка сети, включая анализ работы вторичных цепей как в режиме реального времени, так и через воспроизведение результатов предыдущих экспериментов. Правильный отбор компонентов модели из библиотек программных комплексов, учитывая их характеристики и параметры, является ключевым аспектом для решения разнообразных проектных задач.

Разработанная модель позволяет анализировать режимы функционирования как в штатных условиях эксплуатации, так и при возникновении нештатных ситуаций, что существенно оптимизирует процесс проектирования и учебного процесса, минимизируя риски появления аварийных ситуаций.

В настоящее время существует широкий спектр программных комплексов для моделирования электрических схем: Proteus, Micro-Cap, NI Multisim, LTspice/SwitcherCAD, СИМИКА (Symica), EasyEDA, Electronics Workbench, Logisim и Matlab. Особое внимание стоит уделить программным комплексам NI Multisim и Matlab, которые позволяют создавать сложные динамические модели реальных систем. Эти среды моделирования характеризуются обширными библиотеками компонентов, что обеспечивает возможность реализации схем различной степени сложности.

Для прогнозирования, визуализации и демонстрации частичных разрядов в диэлектрической изоляции в программном комплексе Multisim разработана имитационная модель (рис. 1). Схема замещения дефекта основывается на математической модели многослойной изоляционной структуры. В рамках моделирования изоляционный материал представлен в виде столбчатой структуры с учетом наличия или отсутствия дефектов [4, 5].

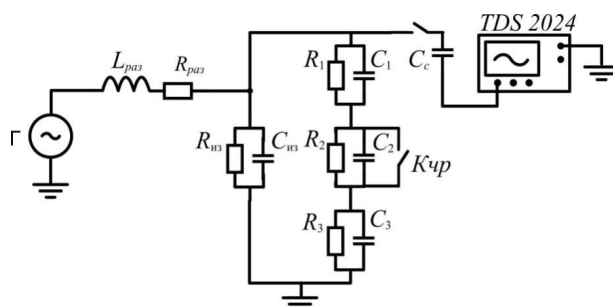


Рис. 1. Модель изоляции в Multisim [1]

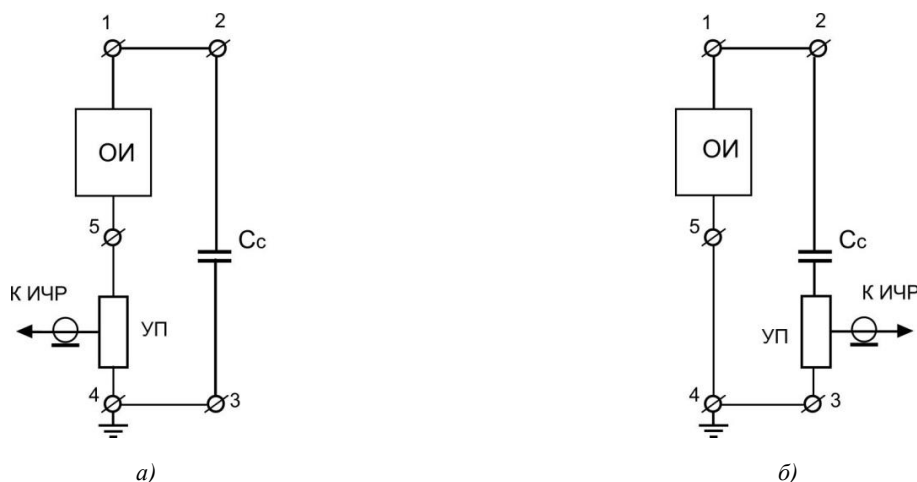


Рис. 2. Описание и регистрация ЧР [2]

На рис. 2. изображено описание и регистрация ЧР, где ОИ — объект испытания; C_c — соединительный конденсатор; УП — устройство присоединения; ИЧР — измеритель ЧР

Описание проблемы. Визуализация процесса формирования частичного разряда проводилась в соответствии со схемой, представленной на рис. 1 а, что коррелирует с индикацией частичных разрядов по схеме на рис. 2 б. Для имитации протекания частичных разрядов в среде Multisim использовался силовой ключ, замыкающий участок изоляционного пространства и демонстрирующий разряд в области локализации дефекта. В ходе моделирования применялись встроенные компоненты: Voltage Suppressor V430MA7B, Spark Plug, Varistor V275LA20A и SWITCH.

В процессе эксперимента для демонстрации частичного разряда была задействована встроенная функция ключа типа SPST (Кчр). Значения сопротивлений в различных состояниях ключа составили: $R_{on} = 100$ мОм при замкнутых контактах (включено) и $R_{off} = 100$ Мом при разомкнутых контактах (отключено). Параметры сопротивлений R_{on} и R_{off} модифицировались в зависимости от характеристик моделируемого дефекта.

Заключительный этап работы после разряда демонстрировался путем размыкания ключа. Данный метод моделирования двух стадий частичного разряда с использованием физического ключа обладает значительными преимуществами по сравнению с другими встроенными компонентами Multisim, так как предоставляет возможность детального анализа функционирования отдельных частичных разрядов.

Моделирование импульса частичного разряда осуществлялось в среде Matlab/Simulink.

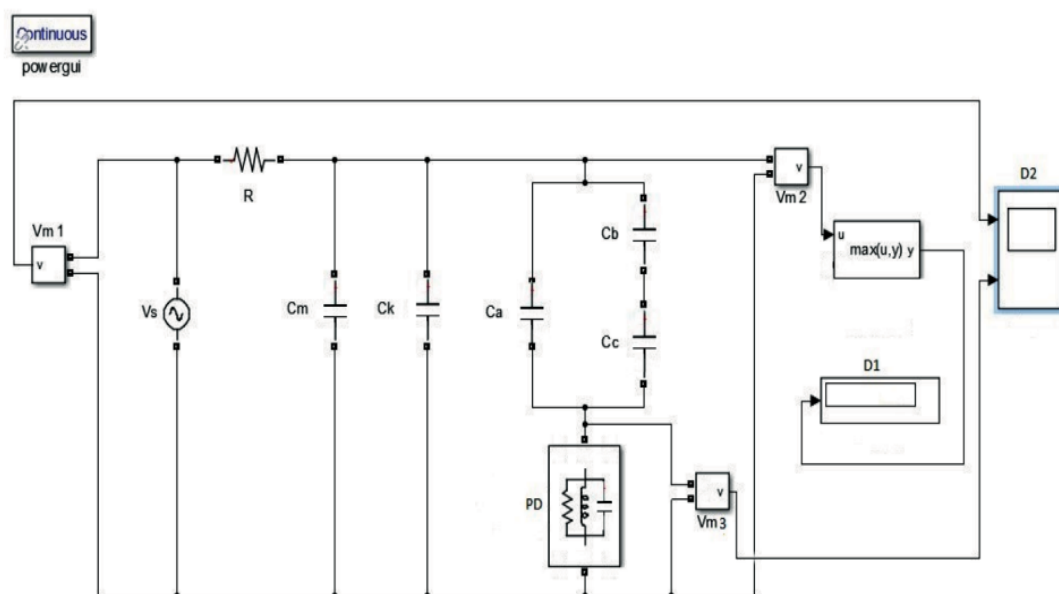


Рис. 3. Экспериментальная схема для моделирования частичных разрядов

Заключение. Идентификация и классификация частичных разрядов представляют собой сложную техническую задачу, требующую комплексного подхода. Основой этого процесса является моделирование происходящих явлений в реальном времени и их запись. Поскольку единичные частичные разряды могут существовать длительное время, не нанося значительного ущерба изоляции, задача заключается в анализе динамики развития этих разрядов. При этом необходимо учитывать, что интенсивность их развития может как увеличиваться, так и снижаться со временем.

Список литературы

1. Вдовико В.П. *Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования*. Новосибирск: Наука; 2007. 155 с.
2. Боев А. Сравнение кабелей с БПИ и СПЭ-изоляцией. URL: <https://eepir.ru/article/sravnenie-kabelej-s-bpi-i-spje-izoljacie/> (дата обращения: 15.03.2025).
3. Mason JH. The Deterioration and Breakdown of Dielectrics Resulting from Internal Discharges. In: *Proceedings of the IEE — Part I: General. Volume 98. Issue 109*. The Institution of Electrical Engineers; 1953. P. 49–51. <https://doi.org/10.1049/pi-1.1951.0019>
4. Михель А.А., Авдонин А.В., Левин Д.М. Обзор методов диагностики кабельных линий напряжений 6 и 10 кВ. *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2009;(2):31–39.
5. Исмаилов Ф.Р., Максудов Д.В. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика. *Вестник УГАТУ*. 2011;15(3):98–100.

Об авторах:

Александр Эдуардович Богачев, аспирант кафедры «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) serher40bog1@gmail.com

Михаил Андреевич Антонов, старший преподаватель кафедры «Цифровые технологии и платформы в электроэнергетике» Донского государственного технического университета (344023, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Страны Советов), mantonov@donstu.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Aleksandr E. Bogachev, Postgraduate Degree Student of the Digital Technologies and Platforms in the Electric Power Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), serher40bog1@gmail.com

Mikhail A. Antonov, Senior Lecturer of the Digital Technologies and Platforms in the Electric Power Industry Department, Don State Technical University 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), mantonov@donstu.ru

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.