

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.31

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В МАКЕТЕ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ¹

А.В. ГУСЕНКОВ, В.Д. ЛЕБЕДЕВ, С.Н. ЛИТВИНОВ, С.А. СЛОВЕСНЫЙ, А.А. ЯБЛОКОВ
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: slit8809@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время в электроэнергетике реализуется концепция интеллектуальной электроэнергетической системы, важными элементами которой являются высоковольтные цифровые трансформаторы тока и напряжения. Отсутствие опыта эксплуатации и показателей надежности их работы замедляет внедрение цифровых технологий в электроэнергетику. Одной из основных причин повреждения высоковольтного оборудования является повреждение изоляции. Наиболее информативными характеристиками, определяемыми в процессе оценки состояния изоляции, являются характеристики частичных разрядов. Эти характеристики нормируются для вращающихся электрических машин и силовых трансформаторов и измеряются внешним для них оборудованием. Существующие решения анализа частичных разрядов не могут быть использованы для цифровых трансформаторов тока и напряжения, поскольку отсутствуют критерии перехода в неработоспособное состояние инновационного оборудования с комплексной изоляцией. В связи с этим актуальным является исследование возможности экспериментального определения характеристик частичных разрядов в изоляции цифровых трансформаторов тока и напряжения с помощью встроенных индуктивных датчиков, для разработки метода контроля технического состояния цифровых трансформаторов тока и напряжения и повышения их надежности.

Материалы и методы. В работе используются макет цифровых трансформаторов тока и напряжения, высоковольтная испытательная установка, цифровой многоканальный осциллограф, индуктивные датчики. Программа эксперимента включает: обнаружение частичных разрядов в макете цифровых трансформаторов тока и напряжения внешней мостовой схемой, регистрацию напряжения возникновения частичных разрядов в моделируемой дефектной области, измерение соответствующей величины кажущегося заряда частичного разряда, обнаружение частичных разрядов в макете цифровых трансформаторов тока и напряжения дифференциальным методом с помощью встраиваемых индуктивных датчиков.

Результаты. Экспериментально измерены характеристики частичных разрядов, возникающих в моделируемой дефектной зоне макета цифровых трансформаторов тока и напряжения. Зарегистриро-

¹ Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме «Мультифункциональная система на основе цифровых трансформаторов тока и напряжения для цифровой подстанции» (Соглашение №14.577.21.0276 о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57717X0276).

ванное на встроенном индуктивном датчике импульсное напряжение, соответствующее кажущемуся заряду 80 пКл, составило 600 мВ при значении испытательного напряжения 2,7 кВ.

Выводы. Встраиваемые индуктивные датчики позволяют реализовать метод контроля состояния изоляции цифровых трансформаторов тока и напряжения по характеристикам частичных разрядов не только в процессе изготовления, но и в процессе эксплуатации, расширяя функционал электронного (микропроцессорного) блока и повышая надежность цифровых трансформаторов тока и напряжения.

Ключевые слова: цифровые измерительные трансформаторы, надежность, частичные разряды, контроль технического состояния, цифровая подстанция, полимерная изоляция.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PARTIAL DISCHARGES IN A MODEL OF A DIGITAL INSTRUMENT TRANSFORMER BY DIFFERENTIAL METHOD

A.V. GUSENKOV, V.D. LEBEDEV, S.N. LITVINOV, S.A. SLOVESNY, A.A. YABLOKOV
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: slit8809@yandex.ru

Abstract

Background. Power facilities are now implementing the concept of smart grid and its essential elements – high-voltage digital current and voltage transformers. However, the implementation of digital technologies is slowed down by the lack of operation experience and reliability indicators. One of the main causes of high-voltage equipment failures is insulation damage. The most informative parameters determined by insulation evaluation are partial discharge characteristics. There are rated values of these characteristics for rotating electrical machines and power transformers measured by external equipment. But the existing method of partial discharge analysis cannot be applied to digital current and voltage transformers as there are no criteria for tripping of the innovative equipment with comprehensive insulation. All this urges us to study the possibility to determine experimentally the characteristics of partial discharges in the insulation of digital current and voltage transformers by using embedded inductive sensors in order to develop a method for condition monitoring of digital current and voltage transformers and improving of their reliability.

Materials and methods. In this work, we have used a model of digital current and voltage transformers, a high-voltage test unit, a digital multi-input oscilloscope and inductive sensors. The experiment includes: detecting partial discharges in the model of digital current and voltage transformers by the external bridge connection, recording the voltage at which partial discharges occur in the simulated fault area, measuring the corresponding value of the apparent charge of the partial discharge, detecting partial discharges in the model of digital current and voltage transformers by a differential method with the help of embedded inductive sensors.

Results. The characteristics of partial discharges in the simulated fault area have been experimentally determined on a model of digital current and voltage transformers. The pulse voltage on the embedded inductive sensor corresponding to the apparent charge of 80 pC was equal to 600 mV at the test voltage of 2,7 kV.

Conclusions. Embedded inductive sensors allow implementing the method of insulation condition monitoring for digital current and voltage transformers in accordance with the partial discharge characteristics both at the stages of production and operation extending the potential of the electronic (microprocessor) module and increasing the reliability of digital current and voltage transformers.

Key words: digital instrument transformers, reliability, partial discharges, technical condition monitoring, digital substation, polymeric insulation

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.2.032-042

Введение. Рассматриваемый цифровой измерительный трансформатор (рис. 1) содержит преобразователь тока 1, включающий первичную обмотку 4 и вторичную обмотку. Вторичные выводы преобразователя тока 5 размещены в электростатическом экране 10. Для преобразования напряжения в конструкции используется резистивный делитель, включающий резисторы верхнего 8 и нижнего 9 плеча. Все преобразователи находятся в

жестком корпусе 6. В состав многокомпонентной изоляции цифровых трансформаторов тока и напряжения (ЦТТН) входят внешний оребренный слой кремнийорганической резины 7, внутренний монолитный полимерный слой 3 и наружный эпоксидный слой 2. Вторичные выводы измерительных преобразователей соединены с электронным блоком 11.

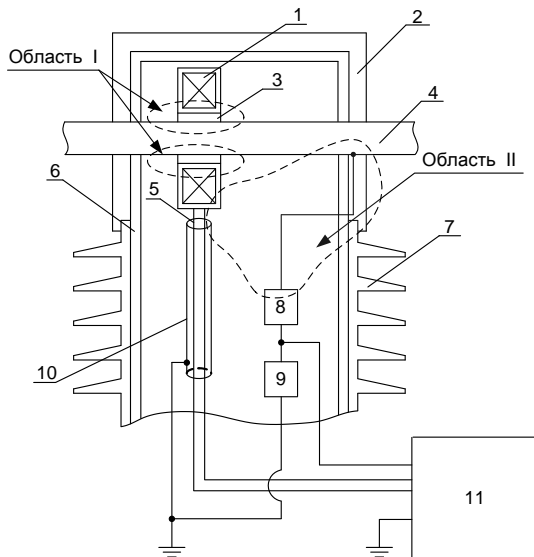


Рис. 1. Структурная схема цифрового измерительного трансформатора: 1 – преобразователь тока; 2 – внешняя изоляция первичной обмотки преобразователя тока; 3 – основная изоляция; 4 – первичная обмотка преобразователя тока; 5 – выводы вторичной обмотки трансформатора тока; 6 – стеклотекстолитовая основа; 7 – внешняя изоляционная крышка; 8 – резистивные элементы верхнего плеча делителя напряжения; 9 – резистивные элементы нижнего плеча делителя напряжения; 10 – электростатический экран; 11 – электронный блок

ЦТТН может перейти в неработоспособное состояние по причине отказов и повреждений вторичной обмотки преобразователя тока, резистивного делителя напряжения, магнитопровода, электронного блока, изоляции. Поскольку не существует статистики отказов элементов ЦТТН, актуальными становятся вопросы оценки технического состояния его отдельных элементов, в частности изоляции.

Оценка состояния изоляции высоковольтного оборудования осуществляется на основании электрических испытаний, которые можно разделить на разрушающие и неразрушающие. К разрушающим испытаниям относятся испытания воздействием повышенного напряжения промышленной частоты, коммутационных и грозовых импульсов перенапряжения.

Эти виды испытаний для определения качества наружной и внутренней изоляции ЦТТН не применимы, так как в его конструкции присутствует резистивный делитель и при воздействии повышенного испытательного напряжения может произойти его тепловое разрушение.

Достаточную для обнаружения внутренних дефектов изоляции информацию можно получить путем измерения характеристики частичных разрядов (ЧР) ЦТТН при рабочем напряжении.

ЧР возникают в местах повышенной напряженности электрического поля, на участках изоляционных конструкций, обладающих пониженной электрической прочностью, в местах расслоений и растрескиваний изоляции. ЧР возникают как локальные перекрытия изоляции [1–3], постепенно разрушая ее, и со временем могут привести к полному пробою.

Наиболее вероятными участками возникновения ЧР в ЦТТН являются области I и II, показанные на рис. 1.

Целями работы являются: доказательства возможности регистрации ЧР в твердотельной изоляции ЦТТН встраиваемыми индуктивными датчиками; регистрация значения напряжения зажигания ЧР; измерение величины кажущегося заряда частичных разрядов в макете ЦТТН.

Методы исследования. Наиболее информативными методами регистрации ЧР являются электрические методы, поскольку они позволяют не только регистрировать ЧР, но и измерять их основные характеристики. Суть электрических методов заключается в регистрации импульсного напряжения, формируемого на измерительном элементе током ЧР, с последующим пересчетом значений напряжений в величину кажущегося заряда.

Кажущийся заряд является одной из основных нормируемых характеристик частичных разрядов¹. Он представляет собой заряд, при мгновенном внесении которого между выводами испытуемого объекта на измерительном устройстве регистрируется такое же импульсное напряжение, как и при реальном частичном разряде. Из сказанного следует, что перед непосредственной регистрацией частичных разрядов необходимо найти коэффициент пропорциональности между кажущимся зарядом и регистрируемой величиной на измерительном устройстве. Данная процедура называется градуировкой, а коэффициент, соответственно, градуировочным. Перед градуировкой собирается одна из испытательных

¹ ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000). Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов.

схем, рекомендованных нормативными документами². По уровню помехозащищенности их можно разделить на две группы: одноканальная с низкой помехозащищенностью и мостовая с высокой помехозащищенностью. Одноканальная схема, в свою очередь, имеет два исполнения: в первом исполнении измерительный элемент включается в цепь заземления испытуемого объекта последовательно с ним, во втором исполнении измерительный элемент включается в цепь заземления соединительного конденсатора (рис. 2).

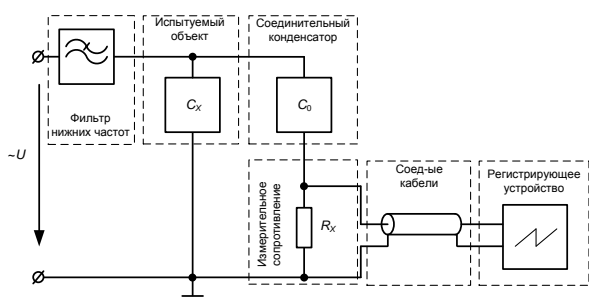


Рис. 2. Испытательная одноканальная схема регистрации ЧР с измерительным элементом в цепи соединительного конденсатора

Соединительный конденсатор C_0 , с одной стороны, увеличивает регистрируемый ток перезаряда емкостей во время ЧР (ток ЧР), с другой стороны, специально вводимый конденсатор позволяет регистрировать токи ЧР в оборудовании, в котором отсутствует возможность отделения от земли заземленного вывода для установки измерительного элемента.

При градуировке на зажимы испытуемого объекта от генератора импульсного напряжения с выходным напряжением $U_{гр}$ через емкость $C_{гр}$ подается известный периодически повторяющийся заряд $q_{гр}$ (рис. 3).

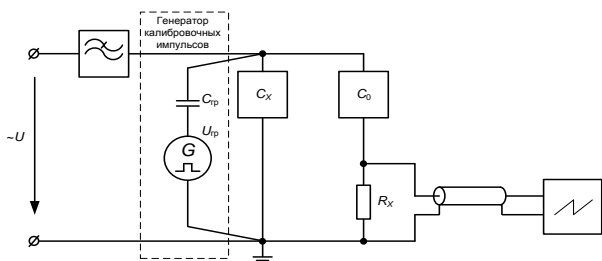


Рис. 3. Подключение генератора градуировочного заряда на примере одноканальной схемы регистрации частичных разрядов

² ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000). Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов.

На измерительном устройстве регистрируется максимальное напряжение $U_{рег.гр}$. Величина заряда $q_{гр}$, Кл, введенного в измерительную схему, рассчитывается по выражению

$$q_{гр} = C_{гр} U_{гр} \tag{1}$$

Градуировочный коэффициент, Кл/В, при этом вычисляется по выражению

$$k_{гр} = q_{гр} / U_{рег.гр} \tag{2}$$

Градуировка производится в полностью собранной схеме и для каждого из объектов испытаний.

Классическое представление изоляции с дефектной зоной в виде расслоения и ее схема замещения показаны на рис. 4.

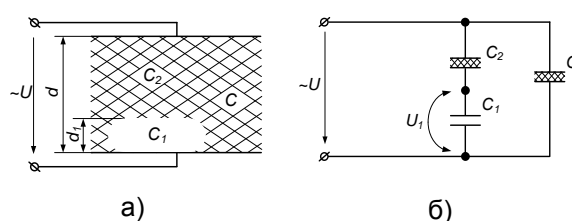


Рис. 4. Участок изоляции с дефектной зоной (а) и схема замещения участка изоляции с дефектной зоной (б): U_1 – напряжение на дефектной зоне; U – испытательное напряжение; C_1 и C_2 – емкости газовой полости и последовательно включенного с ней диэлектрика соответственно; C – оставшаяся емкость изоляции объекта

Если у показанного на рис. 4,а газового включения плоские грани, то емкости, Φ , включения и изоляции примыкающего участка определяются соответственно по формулам:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} S_n}{d_1} \tag{3}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2} S_n}{d - d_1} \tag{4}$$

где $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, $\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$; ϵ_{r1} – относительная диэлектрическая проницаемость газового включения; ϵ_{r2} – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции; d_1 – толщина дефектной зоны; d – расстояние между электродами; S_n – площадь поверхности газового включения.

Напряжение U_3 , при котором происходит пробой воздушного включения в дефектной зоне (напряжение зажигания ЧР), определяется законом Пашена (рис. 5).

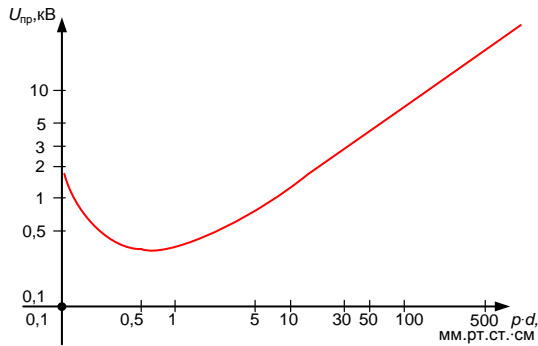


Рис. 5. Кривая Пашена для воздуха

Таким образом, $U_3 = f(pd_1)$. При подаче на испытуемый объект синусоидально изменяющегося испытательного напряжения в определенный момент времени, когда U_1 становится равным U_3 , происходит пробой газового включения. Напряжение на электродах, В, в этот момент времени находится по выражению

$$U_{ч.п.з} = U_3 \frac{C_2 + C_1}{C_2}. \quad (5)$$

При пробое напряжение на газовом включении падает не до нуля, а до определенного значения U_n (напряжение погасания ЧР). Напряжение погасания для газовых включений размера ≈ 100 мкм находится в пределах $(0,1 \div 0,9) \cdot U_3$ [4]. Напряжение на электродах, В, в этот момент времени находится по выражению

$$U_{ч.п.п} = U_n \frac{C_2 + C_1}{C_2}. \quad (6)$$

Значение кажущегося заряда, Кл, находится по выражению (7)

$$q_{ч.п.} = (U_3 - U_n) C_2 = \Delta U C_2. \quad (7)$$

В зависимости от характера испытательного напряжения, процесс возникновения частичных разрядов повторяется циклически. Частичные разряды могут периодически прекращаться по двум причинам: или из-за увеличения давления газа во включении, или из-за существенного увеличения проводимости стенок полости.

С расширением дефектной зоны уменьшается C_1 и увеличивается C_2 , при этом уменьшается напряжение зажигания ЧР и увеличивается кажущийся заряд, что может быть использовано в качестве диагностического признака определения состояния изоляции. Более подробно процесс формирования разрядов на дефектных участках изоляции описан в [5–7].

В качестве измерительных элементов для регистрации импульсных напряжений, создаваемых токами ЧР, могут применяться резистивные или индуктивные датчики. В многочисленных исследованиях, посвященных реализации электрических методов регистрации ЧР, показано, что частотные компоненты сигнала импульсного тока ЧР занимают высокочастотный (ВЧ) и сверхвысокочастотный (СВЧ) диапазоны [8]. Поэтому для регистрации ЧР в указанных частотных диапазонах целесообразно применение индуктивных датчиков. При этом для токов промышленной частоты датчики имеют малое сопротивление.

Между элементами высоковольтных измерительных трансформаторов в момент возникновения ЧР проходит множество емкостных токов, даже при незначительной величине емкости между ними. Полная емкость исследуемой модели включает в себя частичные емкости: между первичной обмоткой преобразователя тока и заземленным электростатическим экраном (ЭЭ) преобразователя тока; между электродами резисторов делителя напряжения; между резисторами делителя напряжения и ЭЭ. В электрической схеме замещения на рис. 6 они представлены сосредоточенными емкостями.

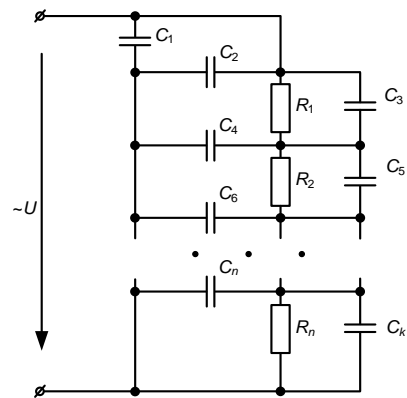


Рис. 6. Электрическая схема замещения ЦТТН: C_1 – емкость между первичной обмоткой преобразователя тока и ЭЭ; C_2, C_4, C_6, C_n – емкости между резисторами и ЭЭ; C_3, C_5, C_k – емкости между электродами резисторов

При наличии дефекта во внутренней изоляции в месте действия наибольшей напряженности электрического поля (например, область I на рис. 1) схема замещения примет вид, показанный на рис. 7,а.

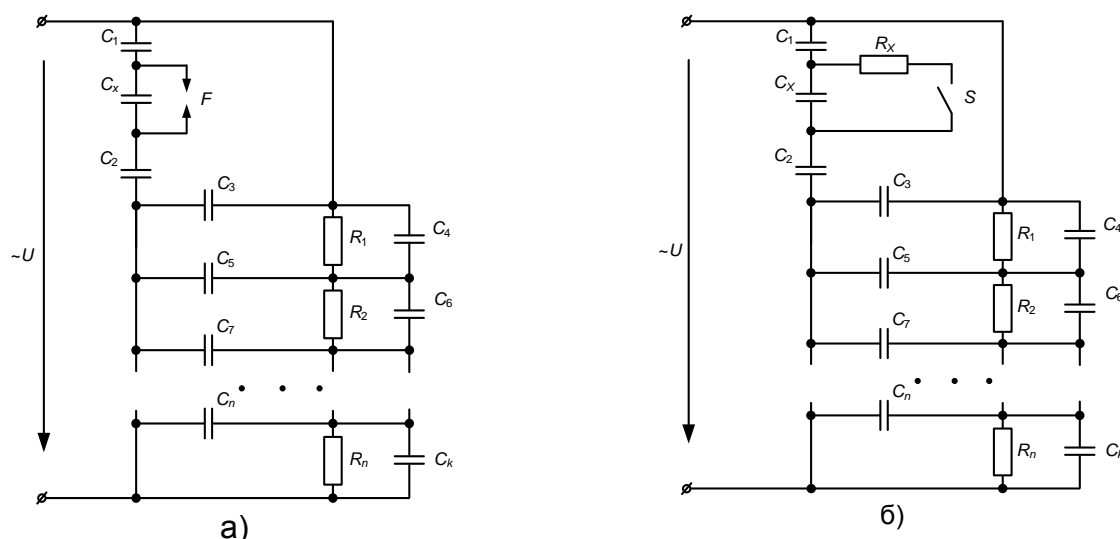


Рис. 7. Электрическая схема замещения ЦТТН: а – с учетом газового включения; б – в момент перекрытия газового включения: F – разрядный промежуток; C_1 – емкость между первичной обмоткой и газовым включением; C_2 – емкость между ЭЭ и газовым включением; C_x – емкость газового включения; R_x – активное сопротивление канала разряда; S – эквивалент искрового промежутка

На рис. 7,а дефектная зона представлена искровым промежутком емкостью C_x . Емкости диэлектрика, примыкающего к дефектной зоне со стороны питания и со стороны ЭЭ, имеют значения C_1 и C_2 соответственно. Поскольку диэлектрическая проницаемость дефектной зоны меньше, чем проницаемость полимерной изоляции, напряженность электрического поля внутри зоны выше напряженности на неповрежденных участках изоляции, поэтому разряд происходит на этом участке. Возникновение частичного разряда эквивалентно шунтированию дефектной зоны C_x сопротивлением R_x (рис. 7,б). Пути протекания импульсных токов при разряде показаны на рис. 8.

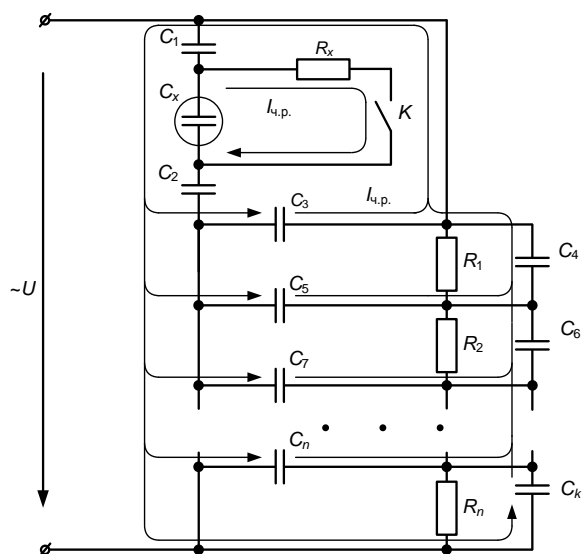


Рис. 8. Схема распределения токов частичных разрядов в электрической схеме замещения цифрового измерительного трансформатора

Анализ схемы, представленной на рис. 8, показывает, что распределение токов частичных разрядов имеет сложную картину, а регистрация импульсных напряжений, формируемых токами частичных разрядов, возможна на измерительном элементе, установленном в цепи заземления ЭЭ. Таким образом, измеряя импульсные напряжения, формируемые токами ЧР, можно судить о состоянии изоляции.

Разработанный макет ЦТТН (рис. 9) содержит медный стержень 1 (первичная обмотка преобразователя тока), к которому подключается высокопотенциальный вывод резистивного делителя (РД) 2. Низкопотенциальный вывод РД подключается к заземленному основанию макета 3 через индуктивный измерительный элемент 4. На стержне располагается модель преобразователя тока, содержащая эквивалент магнитопровода из непроводящего материала, поверх которого намотана токопроводящая фольга 5, выполняющая роль ЭЭ, соединенного с основанием макета через индуктивный измерительный элемент 6. В верхней части макета между высокопотенциальным медным стержнем и фольгой формируется воздушный промежуток, имитирующий газовое включение в твердой изоляции внутри трансформатора. Стержень закреплен на опорных изоляторах 7, нижний конец которых соединен с основанием макета. На стержне располагается конструктивный элемент, реализующий свойства соединительного конденсатора, при этом высокопотенциальным электродом является токоведущий стержень, а низко-

потенциальный электрод 8 отделен от токоведущего стержня твердой изоляцией. Низкопотенциальный электрод соединяется с основанием макета через индуктивный измерительный элемент 9.

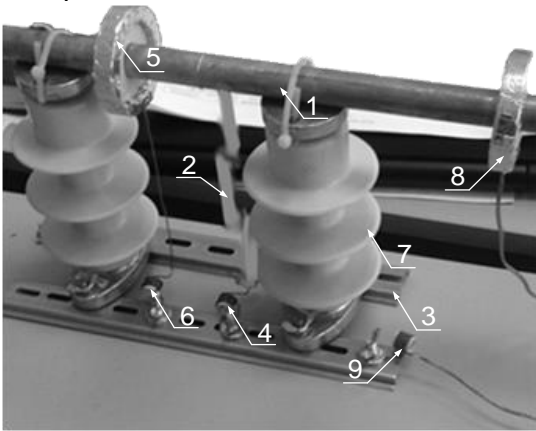


Рис. 9. Внешний вид макета цифрового комбинированного трансформатора тока и напряжения для определения внутренних частичных разрядов

В соответствии с программой эксперимента, на макете исследуется возможность обнаружения частичных разрядов с использованием внешней установки [9], схема которой представлена на рис. 10.

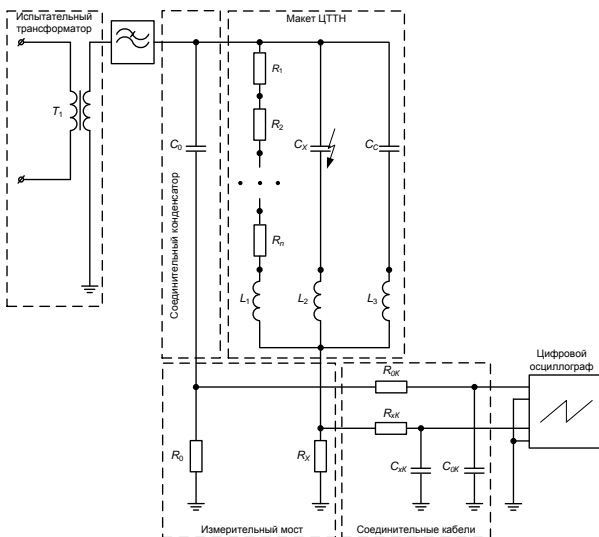


Рис. 10. Внешняя мостовая схема регистрации ЧР в макете ЦТТН: C_0 – емкость соединительного конденсатора; C_x – емкость дефектного участка изоляции; C_c – емкость конструктивного элемента; R_1 – R_n – сопротивления РД; L_1 , L_2 , L_3 – встраиваемые индуктивные датчики; R_0 , R_x – резистивные измерительные сопротивления мостовой схемы; R_{0K} , R_{xK} – согласующие сопротивления; C_{xK} , C_{0K} – емкости измерительных кабелей

Результаты. В схеме, реализующей мостовой способ регистрации ЧР (рис. 10), импульсные напряжения, формируемые токами ЧР, с измерительных элементов R_0 , R_x подаются на входы многоканального цифрового осциллографа. Эта схема обеспечивает визуальное выделение импульсных сигналов от частичных разрядов, сдвинутых на 180° относительно друг друга на фоне синфазных внешних импульсных помех. Для определения величины кажущегося заряда была выполнена градуировка измерительной схемы. На рис. 11 показаны напряжения, зарегистрированные на измерительных элементах при подаче градуировочного импульса.

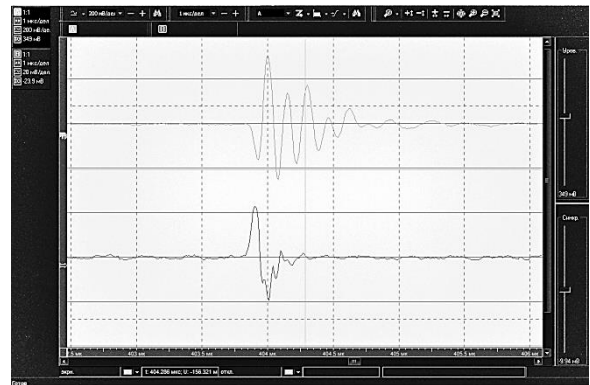


Рис. 11. Напряжения, регистрируемые на измерительных элементах при градуировке: верхний луч – напряжение, регистрируемое на R_x ; нижний луч – напряжение, регистрируемое на R_0

В процессе градуировки в схему вводился градуировочный заряд, равный 750 пКл, формирующий на измерительном элементе максимальное напряжение, равное 160 мВ, при этом градуировочный коэффициент, нКл/В, составил

$$k_{гр} = \frac{q_{гр}}{U_{рег.гр}} = \frac{750 \cdot 10^{-12}}{160 \cdot 10^{-3}} = 4,69. \quad (8)$$

Затем, согласно программе эксперимента, определялись напряжение возникновения ЧР и величина кажущегося заряда в воздушном промежутке, имитирующем газовое включение в твердой изоляции. Для этого испытательное напряжение плавно подавалось на макет ЦТТН до начала возникновения частичных разрядов. Осциллограммы зарегистрированных импульсных напряжений на измерительных элементах показаны на рис. 12.

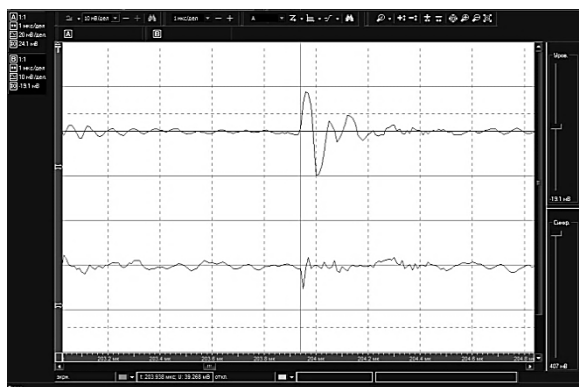


Рис. 12. Напряжения, зарегистрированные на измерительных элементах при испытании: верхний луч – напряжение, регистрируемое на R_x ; нижний луч – напряжение, регистрируемое на R_0

Результаты измерений свидетельствуют о том, что частичные разряды в макете ЦТТН возникают при действующем значении испытательного напряжения 2,7 кВ. Максимальное значение импульсного напряжения, зарегистрированного на измерительном элементе R_x , составило $U_{\max\text{ЧР}} = 17$ мВ, что соответствует величине кажущегося заряда $q_{\text{ЧР}} = 80$ пКл. На данном этапе эксперимента зафиксировано возникновение частичных разрядов в макете ЦТТН, определено напряжение их зажигания и кажущийся заряд.

На следующем этапе эксперимента исследуется возможность регистрации частичных разрядов в макете ЦТТН дифференциальным методом с помощью встраиваемых индуктивных датчиков (рис. 13).

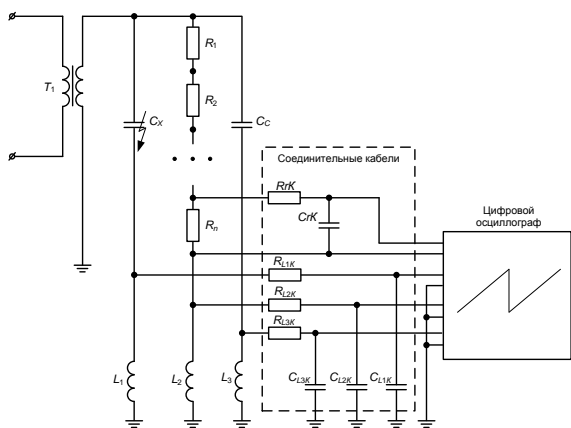


Рис. 13. Дифференциальная схема регистрации частичных разрядов в макете ЦТТН встраиваемыми индуктивными датчиками; R_{rK} , R_{L1K} , R_{L2K} , R_{L3K} – согласующие сопротивления; C_{rK} , C_{L1K} , C_{L2K} , C_{L3K} – емкости измерительных кабелей

Актуальность применения схемы со встроенными индуктивными датчиками обусловлена необходимостью реализации способа регистрации ЧР не только при изготовлении, периодических испытаниях, но и в процессе эксплуатации цифровых трансформаторов.

В схеме (рис. 13) реализуется дифференциальный способ измерения сигналов, формируемых токами ЧР на индуктивных элементах L_1 , L_2 и L_3 , позволяющий выделять полезные сигналы ЧР на фоне импульсных помех. Импульсные напряжения, формируемые токами ЧР на индуктивных элементах L_2 и L_3 , находятся в противофазе импульсному напряжению на индуктивном элементе L_1 . При этом импульсные напряжения помех на всех этих элементах являются синфазными.

На рис. 14 показан уровень шумов в измерительных цепях до подачи испытательного напряжения на исследуемый объект. При регистрации частичных разрядов полезный сигнал должен превышать в два и более раз уровень возможных помех [4]. Максимальное напряжение помех, регистрируемое в одном из каналов, составило 50 мВ. Таким образом, регистрации и последующей обработке должны подвергаться импульсные напряжения, величина которых превышает 100 мВ.

Во время эксперимента на вход первого канала цифрового осциллографа подводилось измеряемое импульсное напряжение с индуктивного элемента, установленного в цепи заземленного экрана преобразователя тока. На вход второго канала подавалось измеряемое импульсное напряжение с индуктивности в цепи конструктивного элемента, имитирующего соединительный конденсатор. На вход третьего канала подавалось измеряемое импульсное напряжение с индуктивности в цепи резистивного делителя, и на вход четвертого канала подавалось измеряемое импульсное напряжение с измерительного сопротивления нижнего плеча резистивного делителя.

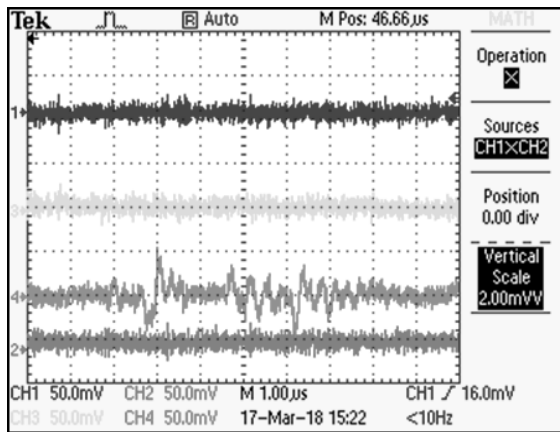


Рис. 14. Уровень шумов в измерительных цепях дифференциальной схемы регистрации частичных разрядов до подачи на макет испытательного напряжения

Осциллограммы зарегистрированных при проведении эксперимента напряжений приведены на рис. 15.

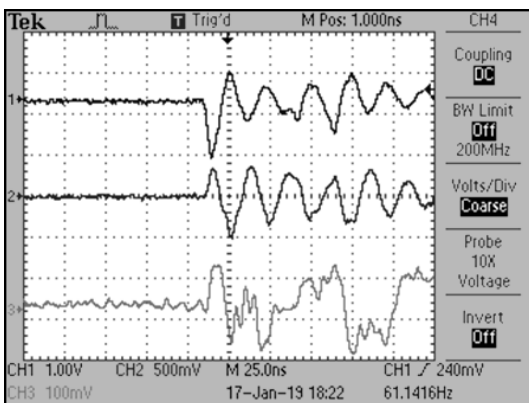


Рис. 15. Осциллограммы импульсных напряжений, формируемых токами частичного разряда на индуктивных датчиках дифференциальной измерительной схемы

Анализ осциллограмм показывает, что импульсное напряжение, сформированное током частичного разряда на датчике в цепи заземленного экрана, находится в противофазе с напряжениями на индуктивных датчиках, включенных в цепь емкостного конструктивного элемента и в цепь заземления делителя. Это распределение напряжения свидетельствует о принадлежности зарегистрированных напряжений к сигналам частичных разрядов. На входе четвертого канала изменение напряжения не зарегистрировано. Характер импульсного напряжения зависит от соотношения параметров R , L , C всей электрической цепи. В ходе эксперимента было отмечено, что его результаты прак-

тически не зависят от расположения конструктивного элемента 8 на стержне 1 (рис. 9). В связи с этим было принято решение перенести этот емкостный конструктивный элемент внутрь макета (регистрация импульсного напряжения производится с индуктивного измерительного элемента по третьему каналу цифрового осциллографа). Дальнейший эксперимент подтвердил, что функция соединительного конденсатора конструктивного элемента сохраняется при расположении его внутри макета. Осциллограммы полученных импульсных напряжений представлены на рис. 16.

Зарегистрированный высокочастотный импульс напряжения соответствует величине кажущегося заряда $q_{\text{ЧР}} = 80$ пКл.

Выводы. Полученные в процессе эксперимента результаты свидетельствуют о возможности регистрации и измерения частичных разрядов во внутренней изоляции ЦТТН встроенными индуктивными датчиками по мостовой схеме. Для отстройки от помех регистрируемые импульсные напряжения, формируемые токами ЧР на измерительных элементах, должны быть выше 100 мВ.

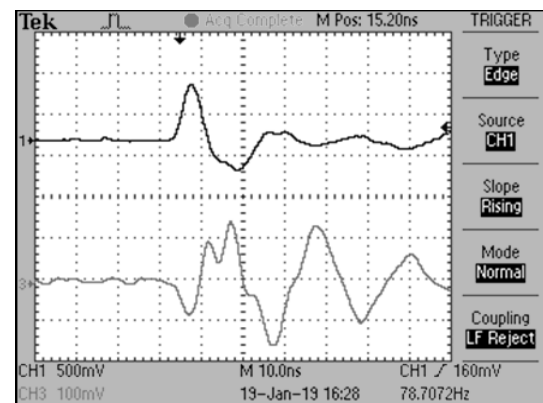


Рис. 16. Осциллограммы максимальных зарегистрированных напряжений, формируемых на индуктивных измерительных элементах макета ЦТТН током частичного разряда в дифференциальной схеме с внутренней соединительной емкостью

Список литературы

1. **David A. Nattrass.** Partial Discharge Measurement and Interpretation // IEEE Eltctical insulation Magazine. – May/June 1988. – Vol. 4, № 3. – P. 10–23.
2. **Vahidinasab V., Mosallanejad A., Gholami A.** Partial Discharge Theory, Modeling and Applications To Electrical Machines. roc. of

the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines. Tenerife, Spain, December 16–18, 2005. – P. 130–135.

3. **Коробейников С.М., Вечёркин М.В.** Физика возникновения, характеристика и классификация частичных разрядов в высоковольтном оборудовании // Электротехнические системы и комплексы. – 2010. – № 18. – С. 204–212.

4. **Кучинский Г.С.** Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с.

5. **Michael G. Danikas, Grigorios E. Vassiliadis.** Models of partial discharges (PD) in enclosed cavities in solid dielectrics: a study of the relationship of pd magnitudes to the sensitivity of pd detectors and some further comments on insulation lifetime // Journal of ELECTRICAL ENGINEERING. – 2003. – Vol. 54, No. 5–6. – P. 132–135.

6. **George Callender.** Modelling Partial Discharge in Gaseous Voids: Thesis of the degree of Doctor of Philosophy. – March 26, 2018.

7. **Pedersen A., Crichton G.C., McAllister I.W.** The Theory and Measurement of Partial Transients // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – June 1991. – Vol. 26, No. 3. – P. 487–497.

8. **Bartnikas R.** Partial Discharges. Their Mechanism, Detection and Measurement // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – October 2002. – Vol. 9, No. 5. – P. 763–808.

9. **Словесный С.А.** Применение мостовых схем для регистрации частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования // VI Междунар. науч.-практ. конф. «Повышение эффективности энергетического оборудования». – Иваново, 2011. – С. 469–472.

References

1. David, A. Natrass. Partial Discharge Measurement and Interpretation. IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 1988, vol. 4, no. 3, pp. 10–23.

2. Vahidinasab, V., Mosallanejad, A., Gholami, A. Partial Discharge Theory, Modeling

and Applications To Electrical Machines. roc. of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines. Tenerife, Spain, December 16–18, 2005, pp. 130–135.

3. Korobeynikov, S.M., Vecherkin, M.V. Fizika vznikenoveniya, kharakteristika i klassifikatsiya chastichnykh razryadov v vysokovol'tnom oborudovanii [Physics of occurrence, characteristics and classification of partial discharges in high-voltage equipment]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2010, no. 18, pp. 204–212.

4. Kuchinskiy, G.S. *Chastichnye razryady v vysokovol'tnykh konstruksiyakh* [Partial discharges in high-voltage structures]. Leningrad: Energiya. Leningradskoe otdelenie, 1979. 224 p.

5. Danikas, M.G., Vassiliadis, G.E. Models of partial discharges (PD) in enclosed cavities in solid dielectrics: a study of the relationship of pd magnitudes to the sensitivity of pd detectors and some further comments on insulation lifetime. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, 2003, vol. 54, no. 5–6, pp. 132–135.

6. Callender, G. Modelling Partial Discharge in Gaseous Voids. Thesis of the degree of Doctor of Philosophy, March 26, 2018.

7. Pedersen, A., Crichton, G.C., McAllister, I.W. The Theory and Measurement of Partial Transients. IEEE Transactions on Electrical Insulation, June 1991, vol. 26, no. 3, pp. 487–497.

8. Bartnikas, R. Partial Discharges. Their Mechanism, Detection and Measurement. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, October 2002, vol. 9, no. 5, pp. 763–808.

9. Slovesnyy, S.A. Primenenie mostovyykh skhem dlya registratsii chastichnykh razryadov v izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya [The use of bridge circuits for recording partial discharges in the insulation of high-voltage equipment]. *VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Povyshenie effektivnosti energeticheskogo oborudovaniya»* [VI International scientific and practical conference «Improvement of power equipment efficiency»]. Ivanovo, 2011, pp. 469–472.

Гусенков Алексей Васильевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, проректор по учебной работе, зав. кафедрой электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, телефон (4932) 385-717, e-mail: avgus@ispu.ru

Gusenkov Aleksei Vasilyevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Vice-Rector for Academics, Head of the Department of Electric Power Stations, Substations and Electric Equipment Diagnostics, telephone (4932) 385-717, e-mail: avgus@ispu.ru

Лебедев Владимир Дмитриевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, телефон (4932) 26-99-04, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Lebedev Vladimir Dmitrievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Head of the Electric Power Systems Automatic Control Department, telephone (4932) 26-99-04, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Литвинов Сергей Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, телефон +7-(920)-367-47-63, e-mail: slit8809@yandex.ru

Litvinov Sergei Nikolayevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of the Department of Electric Power Stations, Substations and Electrical Equipment Diagnostics, telephone +7-(920)-367-47-63, e-mail: slit8809@yandex.ru

Словесный Сергей Алексеевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики, телефон (4932) 26-97-28, e-mail: slovsa@eef.ispu.ru

Slovesny Sergei Alekseyevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Head of the High Voltage Power Engineering, Electrical Engineering and Electrophysics Department, telephone (4932) 26-97-28, e-mail: slovsa@eef.ispu.ru

Яблоков Андрей Анатольевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: AndrewYablokov@yandex.ru

Yablokov Andrei Anatolyevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electric Power Systems Automatic Control Department, e-mail: AndrewYablokov@yandex.ru