© А.М. Ба Бораик, А.Е. Усачев, Р.Г. Ильдарханов, А.Ю. Кубарев

УДК 620.192:621.313.12:621.317.32.015.34

НОВАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ И ПОЛОЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ В НИХ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

А.М. Ба Бораик[1], А.Е. Усачев[1], Р.Г. Ильдарханов[2], А.Ю. Кубарев[1]

[1]Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
[2]ООО ИЦ «Энергопрогресс», г. Казань, Россия
baboraik_4@mail.ru

Резюме: *В работе приводится новая методика определения размеров и положения дефектов в изоляции обмоток статоров турбогенераторов при измерениях в них частичных разрядов. Возможности методики иллюстрируются на примере анализа ЧР в турбогенераторах ТВФ-60-2.*

Ключевые слова: *диагностика турбогенераторов, метод частичных разрядов, размер дефекта, кажущийся заряд, фаза и напряжение возникновения разрядов.*

DOI: *10.30724/1998-9903-2018-20- 1-2 -41-53*

NEW METHOD OF DETERMINING size and PROVISION OF DEFECTS IN THE INSULATION OF WINDINGS OF STATOR OF TURBOGENERATORS AT MEASUREMENT OF PARTIAL DISCHARGES IN THEM

A.M. Baboraik[1], A. E. Usachev[1], R. G. Ildarkhanov[2], A. Y.Kubarev[1]

[1]Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation
[2]LLC EC «Energoprogress», Kazan, Russian Federation

Abstract: *The paper provides a new method for determining the dimensions and position of defects in the insulation of the stator windings of turbogenerators when partial discharges (PD) are measured in them. The possibilities of the methodology are illustrated by the example of the analysis of the PD in turbogenerators brand TVF-60-2.*

Keywords: *diagnostics of turbo generators, partial discharge method, defect size, apparent charge, phase angle of a PD pulse, and partial discharge inception voltage.*

Введение

Обеспечение надёжной работы турбогенераторов (ТГ) является одной из основных задач электроэнергетики. Статистический анализ аварийных ситуаций показывает, что до 56% аварий в ТГ происходит вследствие пробоя изоляции. Одним из наиболее чувствительных и общепризнанных методов контроля состояния изоляции электротехнического оборудования является метод измерения уровня частичных разрядов (ЧР). Основным преимуществом метода ЧР является возможность обнаружения дефектов в изоляции на ранних стадиях их развития.

В настоящее время контроль состояния изоляции ТГ методом ЧР широко применяется на электрических станциях. Однако следует отметить, что критерии опасного

уровня деградации изоляции у разных авторов существенно отличаются [1–3], и на данный момент не существует единого подхода к оценке работоспособности ТГ.

В работах [4; 5] отмечается, что вследствие различного напряжения на разных стержнях обмотки работающего в сети турбогенератора условия возникновения ЧР в нём отличаются от условий при испытаниях ТГ, отключенного от сети. Во время работы изоляция ТГ подвергается дополнительным механическим и тепловым воздействиям по сравнению с отключенным состоянием ТГ. Измерения частичных разрядов на работающих турбогенераторах широко распространены, поскольку ТГ находятся в реальных условиях эксплуатации.

Существующие в настоящее время международные стандарты [6–9] по диагностике методом ЧР изоляции обмоток электрических машин, работающих в сети, не устанавливают необходимые критерии для определения размеров и положения дефектов в изоляции обмоток статоров турбогенераторов и их допустимые величины. Руководства по интерпретации результатов измерения ЧР различных фирм дают лишь общие представления о месте возникновения ЧР [6–8]. В существующих стандартах и руководствах отсутствуют методики, основанные на реальном распределении напряжения по стержням обмоток статоров турбогенераторов.

1.Методика определения размеров и положения дефектов в изоляции обмоток статоров

Наиболее распространенная система контроля изоляции статоров турбогенераторов методом ЧР [6–7] включает в себя использование портативного анализатора с комплектом постоянно установленных ёмкостных датчиков. Ёмкость датчиков выбирается так, чтобы без ослабления пропускать высокочастотные сигналы ЧР и резко снижать амплитуду синусоиды промышленной частоты. Установка по 2 датчика в каждой фазе ТГ позволяет по времени прихода сигнала разделять ЧР и ВЧ помехи, приходящие из сети, что повышает надёжность и информативность метода контроля. С помощью таких устройств у каждого ЧР измеряют два его основных первичных параметра: dU- амплитуду сигнала ЧР и напряжение возникновения ЧР. Часто вместо напряжения возникновения определяется фаза синусоидального напряжения, при которой возникает ЧР. Единичный цикл измерения ЧР обычно длится от 1 секунды до нескольких минут. Результаты обработки двумерного массива зафиксированных ЧР представляют в различных формах, таких как амплитудно-фазовое и амплитудно-частотное представления, произведение числа ЧР с наибольшей амплитудой на величину dU, если число таких разрядов больше 10, представление в виде суммарного тока и мощности ЧР и другие. Можно отметить общий недостаток всех этих представлений – малая наглядность и слабая связь с дефектами изоляции.

В дополнение к существующим формам представления экспериментальных данных о ЧР предлагается новая методика обработки ЧР в турбогенераторах, для представления результатов измерений в более простой и наглядной форме. Методика состоит из следующей последовательности действий:

1. Определение броска напряжения при ЧР – dU

При контроле изоляции обмотки статора методом ЧР через соединительный конденсатор по стандартной методике определяются амплитуды ЧР как положительной, так и отрицательной полярности и фазы возникновения ЧР. Отделение статорных ЧР от сетевых электрических шумов и помех производится на аппаратном уровне.

2. Определение величины «кажущегося заряда» (dq)

По амплитуде ЧР (dU-мВ) и ёмкости стержня $C_{\text{ст}}$ обмотки статора диагностируемого турбогенератора находится величина«кажущего заряда»:

$$dq = dU \cdot C_{\text{ст}}. \quad (1)$$

3. Определение размера дефекта вдоль силовых линий электрического поля

Размер дефекта $d_в$ вдоль поля определяет характеристики разрядных процессов в его полости и имеет связь с величиной ЧР. Такая связь, установленная по результатам многочисленных экспериментов, приводится в работе [10]. Оцифрованные нами экспериментальные значения функции $dq = f(d_в)$, приведённые в работе [10], показаны на рис. 1 в виде черных квадратов. Для использования этих данных в программе обработки результатов измерения ЧР в ТГ по новой методике была построена аппроксимирующая функция, представленная на рис. 1 в виде сплошной линии. Экспериментальные результаты измерений кажущихся зарядов [10], показанные на рис.1 в виде квадратов, хорошо описываются экспоненциальным законом, характерным для стримерного механизма разряда в однородном электрическом поле. Небольшие отклонения при размерах до 0,4 мм, вероятно, связаны с дрейфовым характером разряда при малых величинах дефектов. С помощью этой функции, зная значения dq, можно определить размер дефекта вдоль поля в изоляции ТГ.

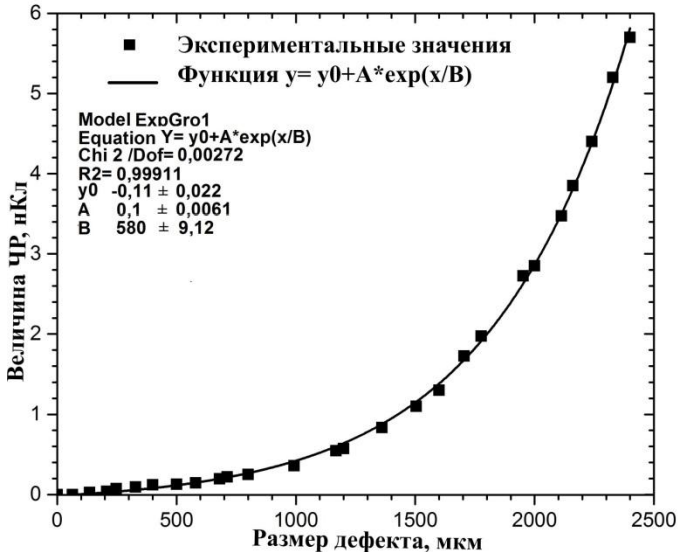

Рис. 1. Зависимость величины ЧР от размера дефекта вдоль поля

4. Определение напряжения на дефекте при возникновении частичного разряда ($U_{чр}$)

Напряжение промышленной частоты (50 Гц) с точки зрения времён зарождения и развития разрядных процессов в газовых включениях в изоляции ТГ можно считать медленно изменяющимся (квазистатическим) напряжением. Связь между напряжением возникновения разряда и размерами разрядных промежутков в однородных полях при различных давлениях и типах газов описывается законом Пашена [10; 11] с диэлектрическими барьерами. Моделирование дефектов в среде *ComSol* показывает, что электрическое поле внутри шарообразных и дискообразных дефектов в миканитовой изоляции ТГ является однородным. Вблизи краёв дефектов типа эллипсоид напряжённость поля уменьшается, и эти области можно не рассматривать. Зависимости пробивного напряжения (напряжённости) в дефекте от его размеров вдоль силовых линий электрического поля при размерах дефектов до 2,5 мм можно на основании данных работ [10; 11] записать в виде полинома 2 степени:

$$U_{чр} = \left(A_0 + A_1 . d_в - A_2 . {d_в}^2\right) * k, \quad (2)$$

$$E_{чр} = \frac{U_{чр}}{d_в}, k = k_1 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{P}{P_0}, \quad (3)$$

где $A_0 = 794{,}86$ В, $A_1 = 4{,}216$ В/мкм, $A_2 = 0{,}00047$ В/мкм^2, k_1 – коэффициент, зависящий от состава газа. Поскольку в [10; 11] измерения проводились в воздушных включениях при комнатной температуре (T=T_0=293 K) и атмосферном давлении (P=P_0=101,325 кПа),этот коэффициент был принят равным 1. В изоляции статоров частичные разряды происходят в порах, заполненных водородом при давлении $P \cong 200$ кПа и температуре $T \cong 353$ *K*, а коэффициент $k_1 = 0{,}5$ для водорода.

Подставляя найденные на предыдущем этапе значения размера дефекта в (2) и значения давления и температуры в момент измерения ЧР, можно определить напряжение $U_{\text{ЧР}}$ (пробивную напряженность $E_{\text{ЧР}}$) вдоль поля, при котором происходит ЧР. Зависимости пробивного напряжения и напряженности от размеров дефекта вдоль поля показаны на рис. 2. При увеличении размера дефекта пробивная напряженность $E_{\text{чр}}$ нелинейно уменьшается.

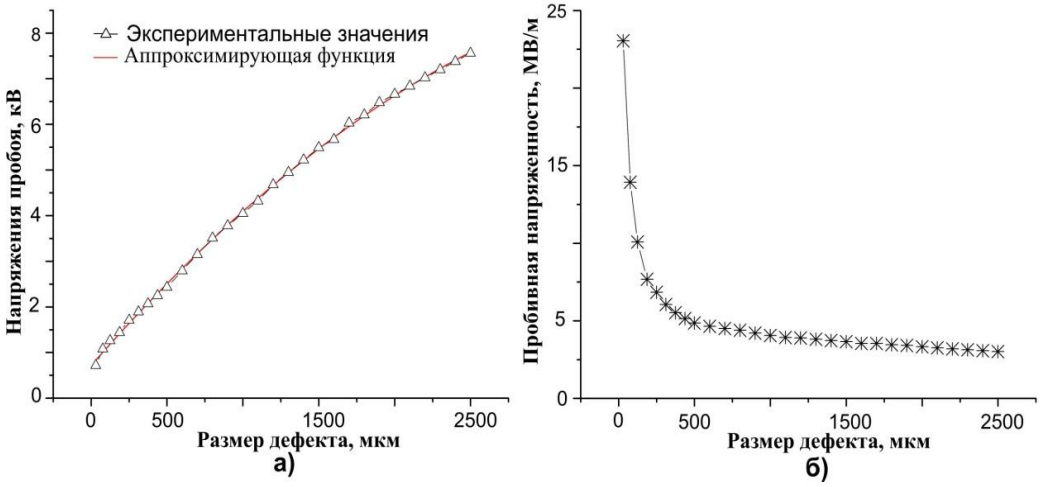

Рис. 2. Зависимости: *а*) $U_{\text{ЧР}}$ и *б*) $E_{\text{ЧР}}$ от размера дефекта вдоль поля

Следует отметить, что значения пробивного напряжения (рис. 2*а*) и пробивной напряжённости (рис. 2*б*) больше, чем предсказывает закон Пашена для разрядных промежутков с однородным электрическим полем и металлическими электродами. Это связано с тем, что границами дефектов является диэлектрик, имеющий большую, по сравнению с металлом, работу выхода электрона, а значит и меньший коэффициент вторичной ионизации на катоде (коэффициент Таунсенда γ).

5. Определение соотношения между напряжённостью поля в дефекте и средней напряжённостью в изоляции (коэффициент напряжённости K_E)

Для определения зависимости коэффициента напряжённости K_E от размеров дефекта были выполнены расчёты электрического поля в миканитовой изоляции стержней статора ТГ с дефектами методом конечных элементов в среде *ComSol*. Моделирование проводилось для различных размеров дефектов, форм и мест их расположения в изоляции. Наиболее часто встречающиеся дефекты канитной изоляции (расслоение пластинок слюды и потеря слоев изоляции) можно представить в виде локальных дефектов типа диска. Для таких дефектов было установлено соотношение между величиной напряженности внутри дефекта и напряженностью вне дефектной части изоляции. Полученная при моделировании зависимость коэффициента напряженности K_E от размера дефекта и параметры функции аппроксимации показаны на рис. 3.

По найденной величине пробивной напряженности $E_{\text{ЧР}}$ (п. 4), размеру дефекта (п.3) и коэффициенту напряженности (рис. 3) находим среднюю напряженность в изоляции стержня:

$$E_{\text{ЧРсред}} = \frac{E_{\text{ЧР}}}{\text{K}_E}. \quad (4)$$

6. Определение напряжения на стержне статора ТГ при возникновении ЧР

Толщина пазовой изоляции ($b_{\text{из}} = 4$ мм) между токоведущим стержнем ТГ и металлом статора значительно меньше длины и высоты самого стержня и его высоты. Как показало моделирование, электрического поле является однородным за исключением малой области вблизи краёв пакета стержней. В этом случае и для расчётов средней напряженности электрического поля можно использовать формулу для однородного поля: $E_{\text{сред}}=U/b_{\text{из}}$. Тогда, зная из п. 5 среднюю напряжённость электрического поля, необходимую для возникновения ЧР в газовой поре изоляции, можно определить минимальное напряжение между токоведущей частью стержня и корпусом статора, при котором возникнет частичный разряд: $U_{\text{ЧРстер}} = E_{\text{ЧРсред}} \cdot b_{\text{из}}$.

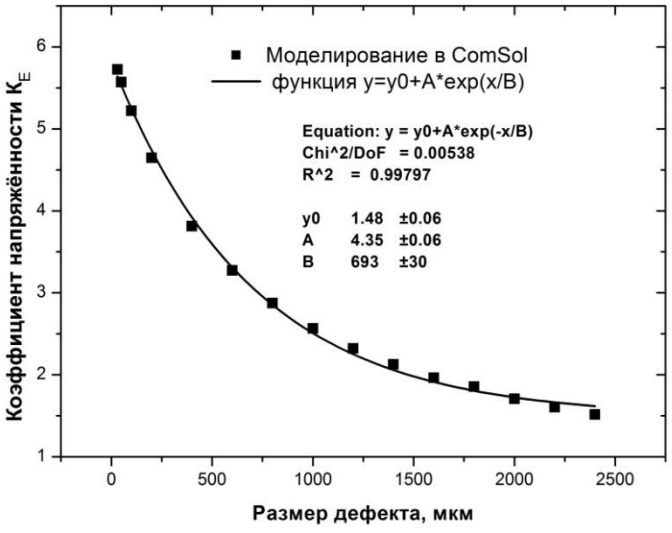

Рис. 3. Зависимость коэффициента напряженности K_E от размера дефекта

7. Определение номера стержня с дефектом

Обмотка фазы турбогенератора состоит из нескольких параллельных ветвей, а в каждой ветви отдельные стержни соединены последовательно. При работе ТГ на концах каждого стержня в пазовой части статора индуцируется ЭДС. Суммарная ЭДС всех последовательно соединённых стержней равна фазному напряжению ТГ. Для каждого типа ТГ при известном количестве стержней в ветви фазы и фазном напряжении можно определить диапазон напряжений для каждого стержня относительно корпуса статора (земли). По известной для каждого ТГ трассировке стержней можно определить номера пазов ТГ, в которых эти стержни расположены. Напряжение в каждом стержне фазы изменяется по закону

$$U = U_{0i} \cdot \sin(\varphi), \quad (5)$$

где U_{0i} – максимальное напряжение на стержне с номером i относительно земли: i – порядковый номер стержня в цепочке последовательно соединённых стержней фазы; φ – фазовый угол промышленной частоты. В работе [4] показано, при измерениях ЧР в работающих в сети турбогенераторах понятие фазового угла теряет смысл напряжения возникновения частичного разряда. Это происходит из-за различия U_{0i} для различных

стержней, а в каком стержне возникает разряд, мы не знаем. Вместе с тем, этот измеряемый параметр можно использовать для определения номера стержня, в котором произошёл ЧР. Частичный разряд может произойти только в том случае, если напряжение возникновения ЧР меньше максимально возможного напряжения на стержне, т.е. $U_{\text{ЧРстер}} < U_{0i}$. Время нарастания (убывания) напряжения промышленной частоты на несколько порядков больше характеристических времён развития ЧР. Можно считать, что ЧР происходят с малым коэффициентом перенапряжения, а изменением напряжения на стержне относительно земли за время развития пробоя газового включения можно пренебречь. При таких условиях по измеренному значению фазового угла ЧР можно определить номер стержня, в котором произошёл частичный разряд.

Пусть ветвь фазы статора ТГ состоит из N последовательно соединённых стержней, и пусть нумерация стержней начинается с $i = 0$ для стержня, один из концов которого имеет напряжение фазы. Тогда, подставляя в (5) вместо U напряжение возникновения ЧР ($U_{\text{ЧРстер}}$), определённое в п. 6, и фазовый угол ЧР φ при котором произошел ЧР, можно определить U_{0i}:

$$U_{0i} = \frac{U_{\text{ЧРстер}}}{\sin(\varphi)}. \quad (6)$$

На каждом стержне наводится ЭДС $\Delta U = \frac{U_0}{N}$, где $U_0 = \frac{U_{\text{ном}} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ – амплитудное значение фазного напряжения, а $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение ТГ. Тогда порядковый номер i стержня с ЧР в ветви последовательно соединённых стержней фазы можно определить следующим образом:

$$i = N - \frac{U_{0i}}{\Delta U}. \quad (7)$$

Если при вычислении амплитудного значения на стержне по формуле (6)окажется, что оно больше амплитудного фазного напряжения U_0 ($U_{0i} > U_0$) , то это означает, что ЧР произошёл в стержне другой фазы и появляется в датчике ЧР фазы в результате излучения в лобовых частях ТГ (переизлучённый ЧР из другой фазы). В этом случае в формуле (6) следует к фазовому углу φ добавить 120 или 240 градусов для определения фазы, из которой произошло переизлучение. Следует отметить, что сам факт наблюдения переизлучённых ЧР из других фаз свидетельствует о повреждении полупроводящего покрытия в лобовой части стержней ТГ.

Применение вышеизложенной методики к обработке данных о ЧР в обмотках статора работающих ТГ позволяет улучшить диагностические возможности метода ЧР, а также дать дополнительную информацию о месте возникновения дефектов и их размерах.

Пример применения методики определения размеров и положения дефектов в изоляции

Вышеприведённая методика обработки экспериментальных данных ЧР в работающих ТГ применима к любому типу генераторов. В качестве иллюстрации возможностей и удобства представления информации по новой методике приводится обработка измерений ЧР в обмотке статора ТГ марки ТВФ-60-2.

При проведении измерений использовалась схема регистрации ЧР через соединительный конденсатор ёмкостью 80 пФ (рис. 4). Такая схема измерений является одной из двух стандартных схем измерения ЧР [9]. Для подавления сетевых помех применялся метод двух емкостных датчиков ЧР на фазу. Если ЧР происходит в сети (вне ТГ), то его импульс приходит к системному датчику (ЕМС2) раньше, чем к шинному датчику (ЕМС1). При одинаковой длине кабелей связи датчиков с анализатором измеренная разница во времени прихода сигнала ЧР является основанием для аппаратного отсева сетевых ЧР [6–12]. Если же сигнал ЧР приходит на шинный датчик раньше, чем на системный датчик, то это означает, что ЧР произошёл в ТГ, и его характеристики регистрируются программным комплексом.

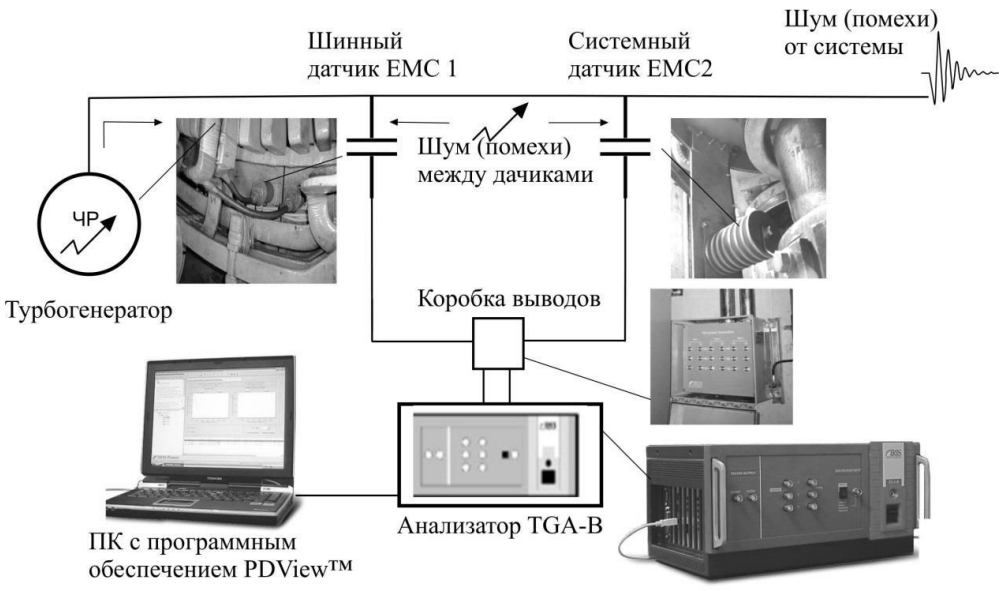

Рис. 4. Схема измерения ЧР в ТГ

Анализ результатов экспериментальных измерений

Измерения ЧР на работающих в сети турбогенераторах, находящихся в нормальных рабочих условиях, проводились на аппаратуре и по методике фирмы *IRES*. Для каждого ЧР в каждой из трёх фаз в память компьютера записывался бросок напряжения при ЧР и фазовый угол, при котором он наблюдался. Измерения бросков напряжения при ЧР проводились в 5-ти поддиапазонах напряжений: 2÷34 мВ, 5÷85 мВ, 10÷170 мВ, 20÷340 мВ, 50÷850 мВ с сохранением измеренного напряжения в одну из 16 ячеек памяти на поддиапазон. Это означает, что погрешность измерения в поддиапазоне 2÷34 мВ составляет ±1 мВ, в поддиапазоне 5÷85 мВ – ±2,5 мВ и т.д. Обработка результатов эксперимента проводилась как по стандартной методике фирмы *IRES*, так и с использованием программы “*PD ANALYZER-KSPEU”*, созданной на основе вышеизложенной методики [13]. Примеры представления экспериментальных результатов по новой методике показаны на рис. 5 и рис. 6.

Рис. 5. Распределение дефектов по стержням фазы А в поддиапазоне ЧР 2÷34 мВ

При измерении ЧР в трех фазах *A*, *B* и *C* в поддиапазоне 2÷34 мВ наименьшее число ЧР наблюдалось в фазе *A*, где самые большие дефекты с размером ≈ 0,64 мм находятся в 6, 7 и 8 стержнях. Дефекты с размерами ≈ 0,3 и 0,34 мм наблюдаются в стержняхс номерами от 1 до 9 (рис. 5). В разработанной программе можно отдельно представить число и размер всех дефектов в каждом отдельном стержне. Например, в фазе С в стержне № 6 имеется 7 дефектов (рис. 6) самый большой из которых имеет размер 0,64 мм с числом повторения 3, а наибольшее число повторения ЧР имеет дефект с размером 0,19 мм.

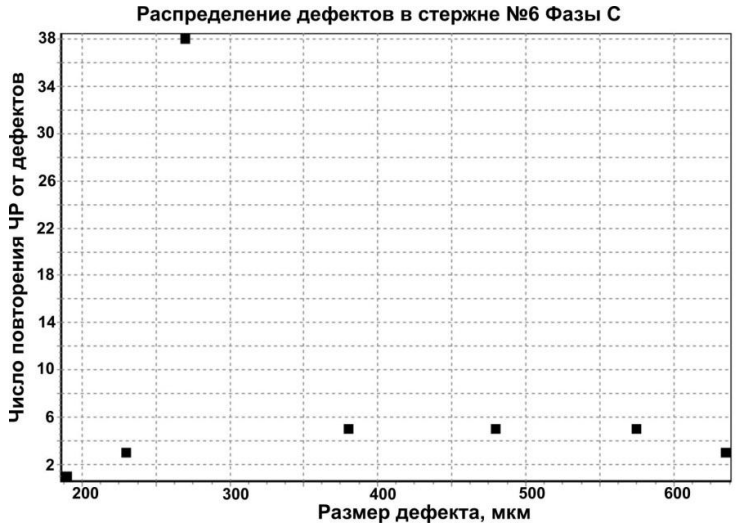

Рис. 6. Распределение дефектов в стержне № 6 фазы *C* в поддиапазоне 2÷34 мВ

При обработке экспериментальных результатов по новой методике оказалось, что ЧР наблюдаются только в первых 9 стержнях, считая от фазного вывода. В стержнях более удалённых от фазного вывода (стержни с номерами 10÷24) частичные разряды не наблюдаются. В этих стержнях амплитудного значения напряжения не достаточно для создания пробивной напряженности электрического поля в дефектах таких размеров.

Измеряемый бросок напряжения при ЧР однозначно определяет размер дефекта, а фазовый угол – порядковый номер стержня в цепочке последовательно соединённых стержней ветви фазы. Экспериментально установлено, что в высоковольтных электрических машинах при рабочих напряженностях в течение длительного времени (практически всего срока службы) существуют ЧР заметной интенсивности, не приводящие к снижению электрической и механической прочности. Эти разряды мало влияют на надежность и долговечность изоляции электрических машин, так как в состав этой изоляции входит неорганический диэлектрик — слюда, весьма стабильный к воздействию ЧР. Такие ЧР могут возникать в газовых включениях в толще изоляции, особенно в миканитовой изоляции. Возникновение крупных газовых включений может привести к значительному увеличению интенсивности ЧР, что может повлечь за собой ускоренное разрушение изоляции этими разрядами [1; 2; 14].

Эмпирические пределы, подтвержденные практикой, могут быть использованы в качестве основы для количественной оценки результатов испытаний. Более того, количественный тренд ЧР и сравнение с машинами аналогичной конструкции и с аналогичной изоляционной системой, измеренный при аналогичных условиях работы с использованием того же измерительного оборудования, рекомендуется для надежной оценки состояния изоляции обмотки статора [6; 7].

При использовании предложенной методики можно оценить, какой импульс от ЧР является опасным для ТГ типа ТВФ-60-2. Так, при величине броска напряжения при ЧР dU = 460 мВ размер дефекта будет около 2 мм, что составляет 50% от толщины изоляции стержня и является критической величиной для изоляции стержня.

Ряд фирм на основании многочисленных измерений уровня ЧР в ТГ выработали эмпирические критерии опасного уровня ЧР. Например, в работе [2] на основании анализа 400000 результатов измерения ЧР в ТГ было установлено, что в турбогенераторах напряжением 10÷13 кВ с водородным охлаждением при измерении ЧР через соединительный конденсатор емкостью 80 пкФ, опасным уровнем ЧР является уровень с величиной dU = 393÷485 мВ. В работе [1] считается, что опасным уровнем ЧР в турбогенераторах напряжением 10÷12 кВ при измерении через соединительный конденсатор является значение dU = 250÷600 мВ. Такие оценки величины опасного уровня броска напряжения при ЧР, основанные на многолетнем опыте диагностики ТГ ведущими диагностическими центрами мира, являются подтверждением работоспособности предложенной методики.

С помощью разработанного программного комплекса можно визуально отобразить состояние изоляции обмоток всех фаз во всех пяти измеряемых поддиапазонах. На рис. 7 в виде трёхмерной столбчатой диаграммы показаны размеры дефектов и их число в различных стержнях фаз *B*. Из диаграммы (рис. 7) видно, что в фазе *B* имеются дефекты с размером 0,5÷0,9 мм в диапазоне стержней 3 и 6.

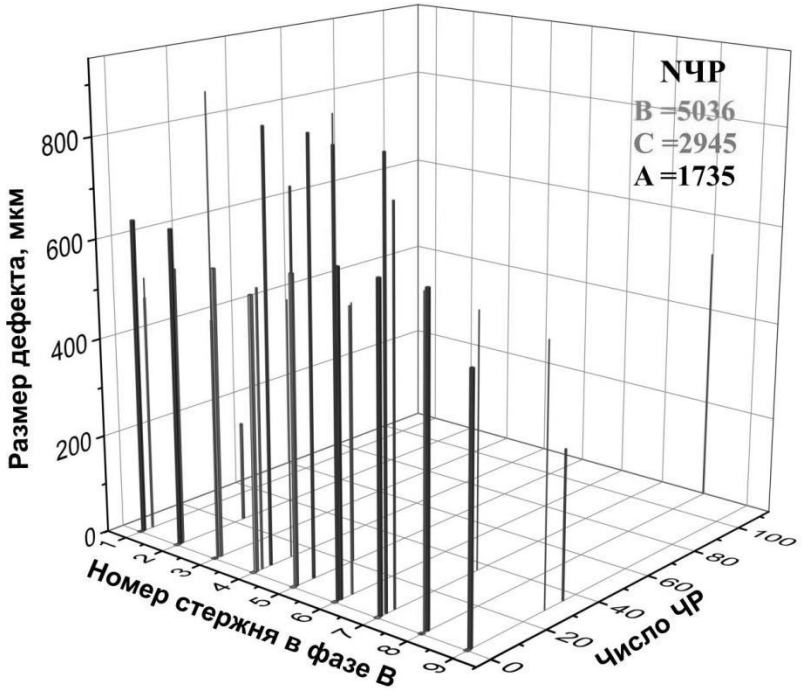

Рис. 7. Распределение размеров дефектов и числа ЧР от них по стержням фаз B

Новая методика обработки данных ЧР и разработанная на её основе программа позволяют определить, какие из частичных разрядов, представленных на стандартной амплитудно-фазовой диаграмме, происходят от дефектов в фазе, в которой стоит датчик, например, в фазе *A*, а какие происходят от дефектов в обмотке других фаз, например, *B* и *C*, и попадают в датчик фазы *A* за счёт излучения через повреждённые участки в лобовой части изоляции. Пусть, например, на датчике фазы *A* при фазовом угле $\varphi^{\circ} = 36°$ был зарегистрирован сигнал ЧР с амплитудой dU = 20 мВ. Следуя пп. 1–3 вышеописанной

методики, получаем, что размер дефекта вдоль поля равен d = 396 мкм. Чтобы ЧР при таком дефекте произошёл, в соответствии с пп. 4–6, величина приложенного напряжения на стержне должна быть $U_{\text{ЧР.стер.}}$ = 5620 В. Такое напряжение может быть в стержнях от 1 до 8, если отсчёт начинать от линейного вывода, поскольку только в этих стержнях амплитудное значение напряжения превышает 5620 В. Поскольку измерен фазовый угол, при котором произошел ЧР, то, согласно п. 7 методики, можно конкретно определить напряжение стержня U_{0i}, в котором произошёл ЧР. При φ°=36° таким напряжением является U_{0i}= 9562 В. Такого напряжения между стержнем и корпусом ТГ быть не может, поскольку оно превышает максимальное амплитудное фазное напряжение ТГ ($U_{0i} \geq U_{\text{амл.фаз}}$). Из этого результата можно сделать вывод, что предположение о том, что ЧР произошёл от дефекта в фазе A, является не верным. В этом случае в (6) к φ° =36° следует добавлять либо 120°, либо 240°, что означает, что ЧР произошёл в другой фазе [6; 7; 15; 16]. Таким образом, для каждой величины измеренного броска напряжения dU можно определить наименьший фазовый угол, соответствующий ЧР от дефектов в этой же фазе A. ЧР при меньших значениях фазового угла относятся к дефектам, расположенным в стержнях другой фазы (переизлучённые ЧР).

Такая зависимость минимального угла (фазы ЧР) от величины ЧР является границей между ЧР от дефектов, находящихся в фазе датчика, и зоной переизлучённых ЧР. Зависимость показана на рис. 8. Пусть, например, ЧР происходит при фазовом угле 45 °. Точка пересечения горизонтали 45° с граничной кривой рис. 8 позволяет определить граничную величину броска напряжения dU = 45 мВ. Если бросок напряжения больше 45 мВ, то это ЧР от дефекта другой фазы. В свою очередь, наличие таких переизлучённых ЧР является признаком повреждения и загрязнения полупроводящего покрытия в лобовой части обмоток ТГ. На рис. 7 показано число разрядов (NЧР), приходящих на датчики фаз как от дефектов в стержнях фазы, в которых установлен датчик (верхнее число), так и число переизлучённых ЧР из других фаз. В фазах В и С наблюдается большое количество переизлученных сигналов ЧР, что указывает на загрязнение и повреждение полупроводящих покрытий лобовой части в фазе В и С.

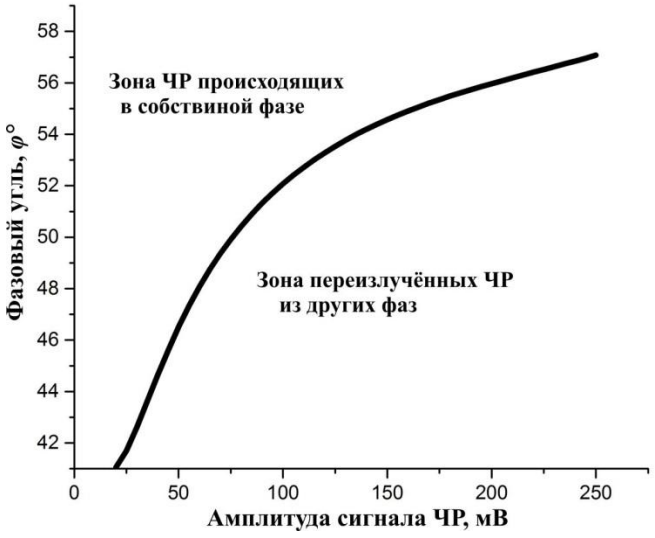

Рис. 8. Зоны собственных и переизлучённых ЧР

В работах [17; 18] для определения типа дефекта предлагается по числу положительных и отрицательных ЧР определять место расположения дефекта в изоляции

стержня. Если число положительных ЧР больше числа отрицательных ЧР, то, как предполагают авторы [17; 18], дефект расположен вблизи корпуса ТГ. Если число отрицательных ЧР больше, то причиной этого являются поверхностные повреждения изоляции (потери полупроводящие покрытия или наличие воздушных промежутков при повреждении прокладки в пазе) или загрязнение. Такой подход к определению места дефекта нельзя признать удовлетворительным. В работе [19] показывается, полярность ЧР зависит от знака скорости изменения напряжения dU/dt в момент возникновения ЧР. Она является случайной величиной, зависящей от степени затухания переходных процессов от предыдущих разрядов и шумов. Полярность ЧР также не может служить единственным условием отнесения сигнала к частичному разряду или к помехе. Частичный разряд в одном и том же дефекте изоляции может быть зарегистрирован как положительной, так и отрицательной полярности.

Выводы

1. Предлагается оригинальная методика определения размеров и положения дефектов в изоляции обмоток статоров турбогенераторов при измерениях в них частичных разрядов.

2. Методика позволяет оценить размер дефекта, его положение в обмотке статора ТГ.

3.Нахождение зоны переизлучённых частичных разрядов помогает определять их количество, что позволяет говорить о новом диагностическом признаке повреждения или загрязнения полупроводящего покрытия в лобовой части обмотки фазы ТГ.

Литература

1. Renforth L. et al. A new technique for the remote partial discharge monitoring of the stator insulation of high-voltage motors located in “Ex”(hazardous) locations //Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2012 Record of Conference Papers Industry Applications Society 59th Annual IEEE.IEEE, 2012. С. 1–10.

2. Warren V.G. Partial discharge testing: a progress report Stator winding insulation thermal class, Iris Power, 2015.

3. Комментарии к применению тестирования On-line Partial Discharge (PD, тестирование частичного разряда в рабочем режиме) для изоляции вращающихся высоковольтных машин: Из-во: HVPD Ltd Издание 4 – май 2009. 17 с.

4. Ба Бораик А.М, Усачев А.Е., Кубарев А.Ю., Маргулис С.М. Особенности наблюдения частичных разрядов в статорах турбогенераторов, включенных в сеть // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 1. 3–4. С. 80–88.

5. Ба Бораик А.М., Усачев А.Е. Особенности наблюдения частичных разрядов в статорах турбогенераторов в онлайн и офлайн режимах // Двадцать третья Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: материалы докладов. Т. 3. М.: Изд-во МЭИ, 2017. С. 400.

6. ГОСТ IEC/TS 60034-27. Машины электрические вращающиеся. Часть 27. Измерения частичного разряда на изоляции статорной обмотки включенных в сеть вращающихся электрических машин. М: Из-во стандарты. 2015. 55 с.

7. IEEE Standards 1434 .Guide for the measurement of partial discharges in AC electric machinery. IEEE.Park Avenue, New York, USA-2014. P. 89.

8. CIGRE Working Group A1.01.06 Application. Of on-line partial discharge tests to rotating machines.CIGRE. December 2010. P- 58.

9. IEC Standard 60270, High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, IEC, 2000.

10. H. A. Illias, G. Chen, and P. L. Lewin, "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 July 19-23, 2009, Harbin, China.

11. Месяц Г. А. Законы подобия в импульсных газовых разрядах // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 10. С. 1069–1091.

12. Iris Power TGA-BTM, “Periodic On-line Partial Discharge Monitoring Using a Portable Instrument for Motors and High Speed Turbine Generators” Iris Power Ver 5. 08/10. Canada, 2010.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660622. « PDANALYZER - KSPEU обработка и интерпретация экспериментальных данных в изоляции обмоток статора турбогенератора методом частичных разрядов» // Ба Бораик Абдулрахман Мохаммед, Усачев Александр Евгеньевич, Кубарев Артём Юрьевич. Дата регистрации 22.09.2017г.

14. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия. 1979.

15. A.J.M. Pemen // Detection of partial discharges in stator windings of turbine generators /by August J.M. Pemen. Eindhoven: TechnischeUniversiteit Eindhoven, 2000.

16. G.C. Stone, T.E. Goodeve, H.G. Sedding, W. McDermid: "Unusual PD pulse phase distributions in operating rotating machines", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2, No.4, August 1995, pp.567–577.

17. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного электрооборудования. Екатеринбург: УрГУПС, 2011. 367 с.

18. Interpretation of PD results – on-line testing – Version 3.2 Iris QMS 08/10. Ver. 3.2. 2008.

19. Ба Бораик А.М., Усачев А.Е., Кубарев А. Ю. Влияние параметров схемы регистрации на форму и амплитуду частичных разрядов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. № 1–2. С. 127–136.

Авторы публикации

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

Усачев Александр Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: aleksandr_usachev@rambler.ru.

Ильдарханов Раиль Гусманович – канд. техн. наук, ООО ИЦ «Энергопрогресс». E-mail: rgi@bk.ru.

Кубарев Артём Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: artemkubarev@yandex.ru.

References

1. Renforth L. et al. A new technique for the remote partial discharge monitoring of the stator insulation of high-voltage motors located in “Ex”(hazardous) locations //Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2012 Record of Conference Papers Industry Applications Society 59th Annual IEEE. IEEE, 2012. С. 1–10.

2. V. Warren, G., “Partial discharge testing: a progress report Stator winding insulation thermal class”, Iris Power, 2015.

3. Comments on the application of testing on-line Partial Discharge (PD, partial discharge testing in operating mode) for insulation of rotating high-voltage machines: Due to: HVPD Ltd Edition 4 - May 2009. 17 p.

4. Ba Boraik A. M., Usachev A. E., Kubarev A. Y., Margulis S. M. Features of monitoring partial discharge in the stator winding insulation of turbine generators, included in the network. // Proceedings of the universities. Energy Problems. 2017. №3–4. P. 80–88.

5. Ba BoraikA. M Features of observing partial discharges in stators of turbogenerators in online and offline modes / Ba Boraik A. M., Usachev A. E. // Twenty-third International Scientific and Technical Conference of Students and Post-Graduate Students "Radioelectronics, Electrical Engineering and Power Engineering": reports. T. 3. Moscow: Izd-vo MPEI, 2017. Pp. 400.

6. Standard IEC / TS 60034-27. Electric rotating machines.Part 27. Partial discharge measurements on the insulation of the stator winding of rotating electrical machines included in the network. M: Standards 2015. 55 p.

7. IEEE Standards 1434 .Guide for the measurement of partial discharges in AC electric machinery. IEEE.Park Avenue, New York, USA-2014. P. 89.

8. CIGRE Working Group A1.01.06 Application. Of on-line partial discharge tests to rotating machines.CIGRE. December 2010. P. 58.

9. IEC Standard 60270, High-voltage test techniques – Partial discharge measurements, IEC, 2000.

10. H.A. Illias, G. Chen, and P.L. Lewin, "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 July 19–23, 2009, Harbin, China.

11. Mesyats GA, Similarity laws in pulsed gas discharges, UspekhiFizicheskikhNauk. 2006. T. 176. №. 10. P. 1069–1091.

12. Iris Power TGA-BTM, “Periodic On-line Partial Discharge Monitoring Using a Portable Instrument for Motors and High Speed Turbine Generators” Iris Power Ver 5 08/10. Canada, 2010.

13.Certificate of state registration computer program №2017660622. "PD ANALYZER – KSPEU processing and interpretation of experimental data in the insulation of the stator windingsturbogenerator's by the partial discharge method" // Ba Borik Abdulrakhman Mohammed, Usachev Alexander Evgenievich, Kubarev Artem Yuryevich. Date of registration 22.09.2017.

14. Kuchinsky G.S. Partial discharges in high voltage structures // L.: Energia. 1979.

15. A.J.M. Pemen. Detection of partial discharges in stator windings of turbine generators / by August J.M. Pemen. Eindhoven: TechnischeUniversiteit Eindhoven, 2000.

16. G.C. Stone, T.E. Goodeve, H.G. Sedding, W. McDermid: "Unusual PD pulse phase distributions in operating rotating machines", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, August 1995, pp. 567–577.

17. 5. Rusov V. A. Measurement of partial discharges in the insulation of high-voltage electrical equipment / by V. A. Rusov Ekaterinburg: USURT,2011. 367 p.

18. Interpretation of PD results - on-line testing. Version 3.2 Iris QMS 08/10.Ver. 3.2. 2008.

19. Ba Boraik A.M., Usachev A.E., Kubarev A.Y. Influence of parameters of the scheme of registration on amplitude and shape of partial discharge // Proceedings of the universities. Energy Problems. 2017. No. 1–2. P. 127–136.

Authors of the publication

Ba Boraik Abdulrahman Mohammed – Master of engineering and technology, graduate student of "Electric stations" (ES), Kazan State Power Engineering University (KGEU). E-mail: baboraik_4@mail.ru.

Alexander Usachev – Dr. Sci. (Phys.-mat.), Prof. of Department."Electric stations" of Kazan State Power Engineering University (KGEU). E-mail: aleksandr_usachev@rambler.ru/

Rail Ildarkhanov – PhD degree, LLC EC «Energoprogress», Kazan. E-mail: rgi@bk.ru.

Artyom Kubarev – PhD, associate professor of "Electric stations" (ES), Kazan State Power Engineering University (KGEU). E-mail: artemkubarev@yandex.ru.

Поступила в редакцию ***13 ноября 2017 г.***