

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ ОЦЕНКЕ РАЗВИТИЯ АКТИВНОСТИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ВРАЩАЮЩЕМСЯ ОБОРУДОВАНИИ

Исмаил ИСМАИЛОВ 

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности
Докторант в области электроэнергетики
E-mail: Ismail1098ismailov@gmail.com

Received: 19 January 2026

Revised: 11 February 2026

Accepted: 5 March 2026

UOT: 621.313; 621.317.33

DOI: <https://doi.org/10.32010/VQPM8829>

Резюме: Надёжность изоляции статора высоковольтного вращающегося оборудования, такого как турбогенераторы, является важным условием обеспечения длительной и безопасной эксплуатации. К числу наиболее распространённых диагностических методов относятся измерение тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$) и измерение частичных разрядов (ЧР). В настоящем исследовании рассматривается взаимосвязь между указанными двумя параметрами на основе полевых данных, полученных в 2023–2024 гг. на силовом генераторе. Несмотря на то, что значения тангенса угла диэлектрических потерь увеличились лишь незначительно, активность частичных разрядов возросла существенно, что указывает на начальную стадию деградации изоляции. Полученные результаты показывают, что использование только показателя тангенса угла диэлектрических потерь может быть недостаточным для надёжного выявления развивающихся дефектов и способно привести к недооценке рисков, связанных с состоянием изоляции. В отличие от этого, измерения частичных разрядов продемонстрировали более высокую чувствительность к незначительным признакам ухудшения состояния изоляционной системы. Исследование подчёркивает ограничения подхода, основанного исключительно на измерении тангенса угла диэлектрических потерь, и подтверждает значимость включения анализа частичных разрядов в программу регулярной диагностики. Совместное применение обоих методов обеспечивает более точную и своевременную оценку состояния изоляции. Такой подход имеет важное значение для предотвращения внезапных отказов и совершенствования стратегий технического обслуживания по фактическому состоянию высоковольтных вращающихся электрических машин.

Ключевые слова: высокое напряжение, частичные разряды, тангенс угла диэлектрических потерь, изоляция статора, силовые генераторы, предиктивное техническое обслуживание, датчики ВЧТГ.

Введение:

Высоковольтные вращающиеся электрические машины, такие как генераторы и крупные промышленные электродвигатели, играют ключевую роль в инфраструктуре производства и распределения электроэнергии. Эксплуатационная надёжность таких машин в значительной степени определяется состоянием их систем изоляции статора. С течением

времени данные изоляционные системы подвергаются совокупному воздействию тепловых, механических, электрических и внешних эксплуатационных факторов, которые в совокупности изменяют их диэлектрические свойства и могут приводить к преждевременным отказам [1]. Среди указанных воздействий электрическое напряжение является особенно неблагоприятным

фактором, поскольку оно может инициировать возникновение частичных разрядов (ЧР) в дефектах изоляции. Активность ЧР ускоряет деградацию изоляционных материалов и способствует формированию электрических древовидных структур, что широко признаётся одним из основных механизмов пробоя твёрдых диэлектриков в высоковольтном оборудовании [2]. Поэтому точное выявление и оценка активности ЧР имеют важное значение для определения состояния изоляции и прогнозирования возможных пробоев.

Двумя широко применяемыми диагностическими показателями для оценки состояния изоляции являются частичные разряды (ЧР) и коэффициент диэлектрических потерь (ДП). Измерение ЧР зарекомендовало себя как важнейший диагностический метод, позволяющий получить представление о физических процессах, лежащих в основе старения изоляции, а также обеспечивающий раннее выявление развивающихся дефектов [3]. В свою очередь, ДП, также известный как тангенс угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$), характеризует диэлектрические потери и обеспечивает общую оценку эффективности и степени деградации изоляции.

Ряд исследований указывает на наличие корреляции между активностью ЧР, значениями ДП и другими диэлектрическими измерениями, такими как метод восстановления напряжения (Recovery Voltage, RV). Например, было показано, что термическое старение изоляции влияет как на картины ЧР, так и на тенденции изменения ДП, что подчёркивает взаимосвязь данных параметров [1]. Кроме того, в недавних исследованиях были предложены гибридные методы измерения ЧР в сочетании с УВЧ- и акустическими методами, главным образом для КРУЭ и другого статического оборудования [15]. Ещё одним типом одновременных измерений, применяемых для вращающегося оборудования, являются измерения ЧР и ДП, которые позволяют существенно сократить время диагностических испытаний, хотя отдельные реализации методов обнаружения ЧР подвергались критике из-за их ограничений и недостаточной надёжности без дополнительных модификаций [4].

Для мониторинга состояния высоковольтных вращающихся машин разработан широкий спектр методов неразрушающего контроля (НК), включая визуальный осмотр, измерение сопротивления изоляции, анализ прироста ДП, выявление ЧР и диэлектрическую спектроскопию [5]. Несмотря на разнообразие доступных методов, взаимосвязь между непрерывной активностью ЧР и изменяющимися значениями ДП остаётся областью, требующей более глубокого экспериментального подтверждения.

Системы изоляции вращающихся машин обычно оцениваются с использованием измерений ДП и прироста ДП, которые дают представление о суммарных диэлектрических потерях и старении изоляции. Однако данные параметры зачастую изменяются незначительно до тех пор, пока деградация не достигнет развитой стадии. В отличие от этого, испытания ЧР обладают высокой чувствительностью к локализованным дефектам, таким как пустоты, расслоения или поверхностные разряды, и всё чаще регламентируются стандартами. В ряде исследований [1–2] показано, что ЧР и ДП предоставляют взаимодополняющую информацию, однако прямое сравнение этих параметров в полевых условиях остаётся ограниченным. В настоящем исследовании демонстрируется корреляция между значениями измерений ДП и ЧР при схожих условиях испытаний, что позволяет упростить существующие методы анализа, которые в дальнейшем будут использованы для оценки предполагаемого срока службы генератора; данный аспект будет рассмотрен в будущих исследованиях. Полученные результаты подчёркивают важное ограничение: один лишь ДП не позволяет надёжно выявлять ранние локализованные дефекты изоляции. За счёт интеграции калиброванных офлайн-измерений ЧР с анализом фазоразрешённых картин ЧР (PRPD) и испытаниями коэффициента диэлектрических потерь данная работа предоставляет практические рекомендации для технического обслуживания по фактическому состоянию и показывает, почему мониторинг ЧР следует рассматривать наряду с традицион-

ными измерениями ДП при диагностике вращающегося оборудования. Настоящее исследование рассматривает влияние непрерывного распространения частичных разрядов на изменения коэффициента диэлектрических потерь с целью уточнения диагностической взаимосвязи между ЧР и ДП в реалистичных эксплуатационных условиях.

Методы и средства

Измерение коэффициента диэлектрических потерь (ДП) во вращающихся электрических машинах в настоящее время стандартизировано ИЕС 60034-27-3, который устанавливает допустимые пределы как для тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$), так и для значений прироста ДП применительно к обмоткам статора электродвигателей и генераторов. Однако установление данных пороговых значений остаётся предметом продолжающихся дискуссий. В то время как многие конечные пользователи считают эти предельные значения достаточно мягкими и легко достижимыми на практике, производители электрических машин выражают обеспокоенность, утверждая, что установленные критерии являются чрезмерно строгими. По их мнению, даже качественно изготовленные статорные катушки и стержни могут не соответствовать данным требованиям, что способно привести к неверной интерпретации качества изоляции [6]. Кроме того, использование исключительно ДП в качестве диагностического показателя может вводить в заблуждение, особенно в случаях, связанных с длительным старением изоляции. В процессе продолжительной эксплуатации машины накопление активности частичных разрядов (ЧР) может не вызывать заметных изменений значений ДП, особенно на ранних стадиях. В результате критические процессы деградации, такие как формирование электрических древовидных структур или увеличение размеров пустот, могут оставаться невыявленными, несмотря на наличие всё более частых или интенсивных импульсов ЧР. Данное ограничение подчёркивает важность не только обнаружения активности ЧР, но и понимания её характеристик и динамики развития во времени.

А. Методы измерения частичных разрядов во вращающемся оборудовании

Измерения частичных разрядов (ЧР) в высоковольтных вращающихся электрических машинах могут выполняться как онлайн-, так и офлайн-методами, каждый из которых имеет свои преимущества в зависимости от целей диагностики и эксплуатационных ограничений.

Онлайн-мониторинг ЧР зарекомендовал себя как эффективный метод оценки состояния изоляции обмотки статора при нахождении машины в эксплуатации [6]. Данный подход обеспечивает непрерывное наблюдение в режиме реального времени без необходимости вывода оборудования из работы, что делает его особенно подходящим для критически важного оборудования в промышленных и энергетических объектах [7]. В процессе номинальной эксплуатации машины импульсы ЧР регистрируются с использованием высокочастотных трансформаторов тока (ВЧТТ) и катушек Роговского (КР), подключённых к системе мониторинга ЧР на базе осциллографа. Указанные датчики, как правило, устанавливаются на заземляющих проводниках машины и работают совместно с разделительными конденсаторами для регистрации кратковременных разрядных процессов. Данные, получаемые в режиме реального времени с помощью такой схемы, отражают фактические механические, тепловые и электрические воздействия, которым подвергается изоляция в процессе эксплуатации, тем самым обеспечивая раннее выявление процессов деградации.

Офлайн-испытания ЧР проводятся на выведенном из работы и обесточенном оборудовании в контролируемых условиях, близких к лабораторным. При данном методе к обмотке статора прикладывается высокое испытательное напряжение с использованием внешнего высоковольтного испытательного источника. Одновременно возникающие импульсы ЧР регистрируются с применением тех же типов датчиков — ВЧТТ, катушек Роговского (КР) или разделительных конденсаторов, подключённых к системе сбора данных на базе осциллографа. Ключевым предварительным условием проведения офлайн-испытаний ЧР является калибровка измерительной системы до подачи напряжения. Та-

кая калибровка обеспечивает точное количественное определение амплитуды ЧР в пикокулонах (пКл) и позволяет привести результаты измерений в соответствии с международными диагностическими стандартами [8–10].

В настоящем исследовании испытательная схема включала Omicron CPC 100 в качестве блока управления, CP TD1 в качестве высоковольтного источника и анализатора ДП, а также CP CR 600 в качестве компенсирующих реакторов для формирования высоковольтного испытательного воздействия

(рис. 1). Для обнаружения и количественной оценки ЧР использовалась система HVPD Longshot совместно с датчиками ВЧТТ и калибраторами ЧР CAL1A (1–100 пКл) и CAL1E (0,5–50 нКл), изготовленными компанией Power Diagnostix Systems GmbH. Процесс калибровки включал подачу эталонного сигнала ЧР в измерительную систему, а также настройку коэффициента усиления и параметров фильтрации регистрирующего оборудования для обеспечения точности измерений.

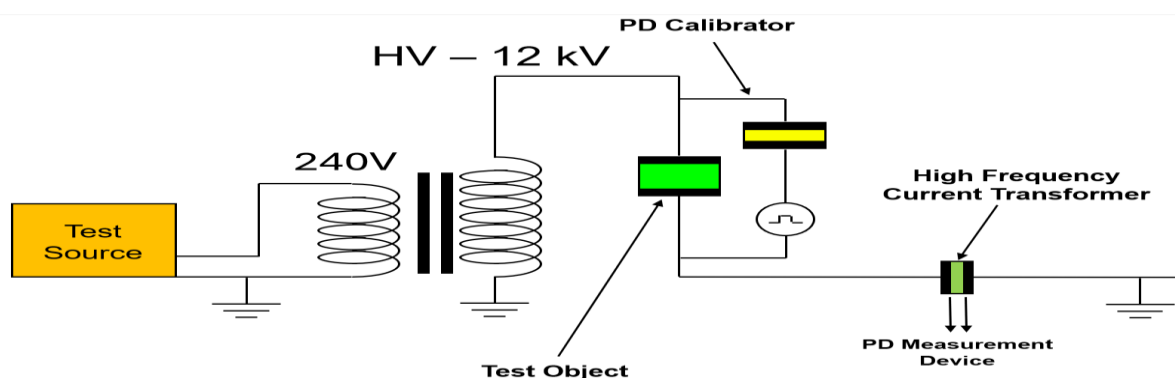


Рисунок 1. Схема подключения для офлайн измерения ЧР [18].

Коэффициент диэлектрических потерь является показателем диэлектрических потерь в изоляции обмотки статора. Измерение ДП применяется для оценки качества как новой, так и состаренной изоляции обмоток статора [7]. В настоящем исследовании для измерения ДП при испытательных напряжениях до 12 кВ использовался испытательный комплект Omicron CPC 100 + CP TD1 + CP CR

600 (рис. 2). Процедура испытаний предусматривает подачу на обмотку статора испытательного напряжения, установленного ИЕС 60034-27-3, с последующим измерением диэлектрических потерь в изоляции. Оценка полученных результатов также выполняется на основании требований, представленных в ИЕС 60034-27-3 [11, 12].

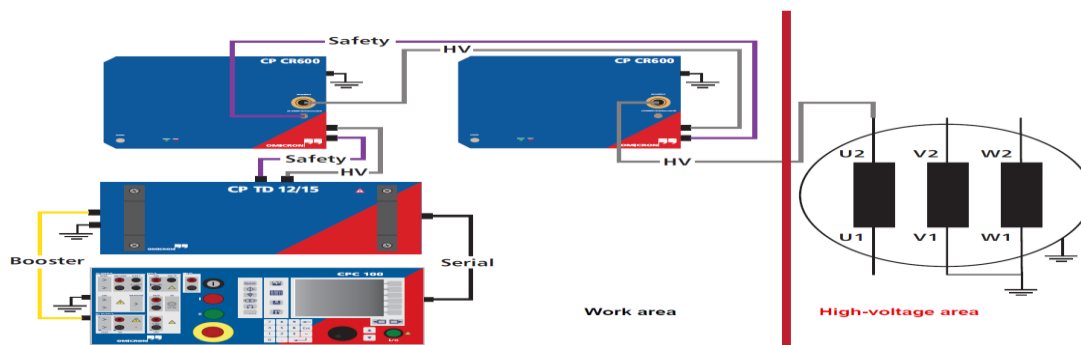


Рисунок 2. Схема подключения для измерения ДП [12].

В течение двух лет на одном и том же турбогенераторе проводились испытания раз в

год, при сопоставимых условиях окружающей среды. Паспортные данные турбогенератора представлены ниже в таблице 1

Таблица 1. Паспортные данные генератора.

#	Паспортные данные генератора	
	Параметр	Значение
1	Производитель	Siemens
2	Модель	SGEN 5 – 100A – 4P
3	Номинальное напряжение L-L (В)	15000
4	Номинальный ток (А)	2117
5	Полная мощность (МВА)	55
6	Частота вращения (об/мин)	1500
7	Коэффициент мощности	0.8
8	Номинальный тепловой класс	F

Первые измерения ДП были выполнены 2 октября 2023 г. После завершения испытаний и тщательного анализа полученных результатов генератор был возвращён в нормальный режим эксплуатации. После одного года непрерывной работы генератор был повторно

испытан 14 октября 2024 г. [13]. Испытание предусматривало поэтапную подачу испытательного напряжения промышленной частоты на обмотку статора с последующей регистрацией соответствующих значений ДП (табл. 2).

Таблица 2. Измерение угла диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери				
Дата:	02 – Октября – 2023		14 – Октября – 2024	
Напряжение L-G (кВ) @ 50 Гц	Tan D (%)	Delta Tan D (%)	Tan D (%)	Delta Tan D (%)
Фаза U: Емкость – 332.901 нФ				
8.66	1.7946	0.0574	2.1240	0.1121
Фаза V: Емкость – 332.986 нФ				
8.66	1.8013	0.0525	2.0987	0.1153
Фаза W: Емкость – 334.161 нФ				
8.66	1.8286	0.0543	2.0987	0.1153

Таблица 3. Параметры окружающей среды во время испытаний.

Параметры окружающей среды		
Параметр	02 – Октября – 2023	14 – Октября – 2024
Температура окружающей среды (С)	22	18
Относительная влажность (%)	69.12	60.81
Атмосферное давление (кПа)	1011.32	1017.48

Было установлено, что по результатам испытаний как 2023, так и 2024 гг. значения ДП возрастали пропорционально увеличению приложенного напряжения. Такое поведение может быть обусловлено следующими факторами: увеличением диэлектрических потерь при более высокой напряжённости элект-

рического поля; иницированием ЧР в пустотах или дефектах изоляции. Сравнение результатов 2023 и 2024 гг. показывает, что значения ДП, полученные в текущем году, указывают на постепенное ухудшение состояния изоляции. Данное ухудшение не является критическим, если не учитывать тот факт, что исходные значения ДП уже близки

к пороговому значению ИЕС 60034-27-3, составляющему 2 %, а в отдельных случаях превышают его. Тем не менее для получения более точного заключения о состоянии изоляции обмотки статора необходимо выполнить сравнительный анализ измерений ЧР за тот же период, что позволит получить дополнительную информацию о степени деградации изоляции [14]. После измерений ДП были проведены офлайн-испытания ЧР с использованием системы HVPD Longshot в качестве системы мониторинга ЧР, датчиков

ВЧТТ, а также испытательного оборудования Omicron, применявшегося для измерений ДП, в качестве высоковольтного испытательного источника. Система мониторинга была откалибрована с помощью калибратора CAL1E при значениях 0,5; 1; 2 и 5 нКл. После завершения калибровки к генератору было приложено испытательное напряжение 8,66 кВ фаза–земля. Результаты испытаний представлены в таблице 4:

Таблица 4. Результаты измерений ЧР за два года.

Измерения ЧР: 02 – Октября – 2023		Измерения ЧР: 14 – Октября – 2024
Фазы	Значения ЧР	Значения ЧР
U	0.642 нКл	2.02 нКл
V	0.766 нКл	2.82 нКл
W	0.479 нКл	1.42 нКл

Картины ЧР, зарегистрированные в 2023 г., соответствуют сигналам ЧР, обусловленным поверхностными разрядами на ранней стадии развития и частичными разрядами в зоне выхода пазов, в соответствии с ИЕС 60034-27-1 «Rotating Electrical Machines —

Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation». Примеры поверхностных разрядов и разрядов в зоне выхода пазов приведены в указанном стандарте (рис. 3–4).

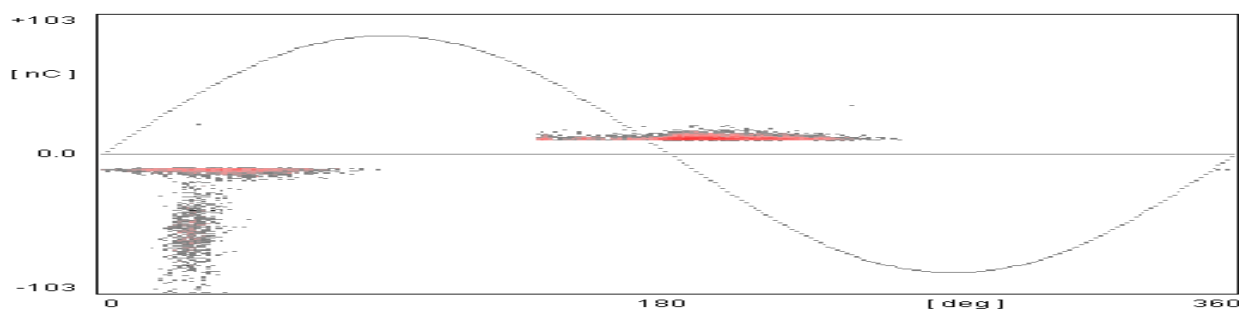


Рисунок 3. Примеры поверхностных разрядов в обмотке статора вызванные разложением изоляции [10]

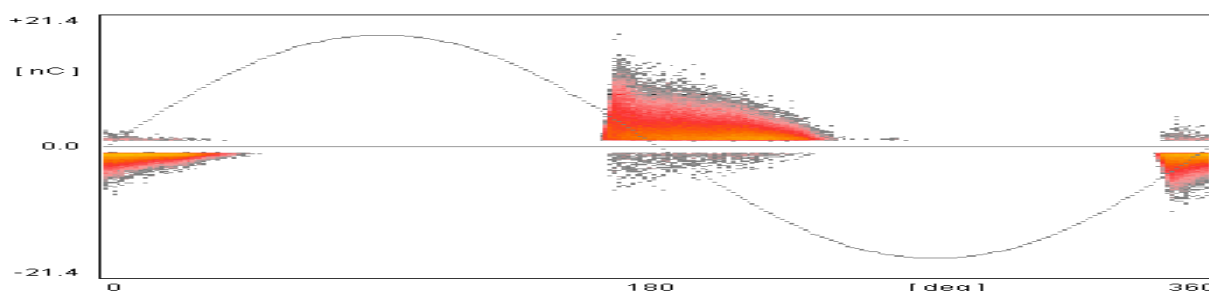


Рисунок 4. Примеры разрядов в пазах и зазорах между ядром статора и стенкой [10]

Несмотря на то, что разряды, измеренные в 2023 г., демонстрируют явную корреляцию с картинами пазовых и поверхностных разрядов, пиковая амплитуда ЧР, полученная в 2023 году, не является критической и не указывает на наличие интенсивных разрядов. Для более детального сравнения аналогичные испытания были проведены в 2024 г (Табл 4). Сравнение значений, полученных в 2023 и 2024 гг., показывает, что характер разрядов в целом остался неизменным. Тем не менее существенное увеличение плотности картин ЧР, а также приблизительно 300%-й рост амплитуды разрядов являются значимыми изменениями и требуют тщательного рассмотрения.

Выводы

Результаты измерений частичных разрядов и коэффициента диэлектрических потерь, полученные в 2023 и 2024 гг., представляют значимую информацию для оценки надёжности ДП и ЧР как диагностических показателей состояния изоляции статора. Сравнение значений ЧР за два года выявляет существенное увеличение их уровня в 2024 г. приблизительно на 300 % по сравнению с 2023 г. Это указывает на значительное ухудшение состояния изоляции генератора. В то же время измерения ДП показали лишь незначительное изменение: с 1,8 % в 2023 г. до 2 % в 2024 г., то есть прирост составил приблизительно 0,2 %; более подробная информация представлена в таблице 2. Такое незначительное изменение ДП не соответствует резкому увеличению значений ЧР. Полученные результаты убедительно свидетельствуют о том, что измерение ДП само по себе не является надёжным параметром для выявления существенных изменений состояния изоляции.

Несмотря на то, что ДП широко используется в качестве показателя старения изоляции, его низкая чувствительность к значительным изменениям амплитуды ЧР подчёркивает ограничения данного метода при выявлении деградации изоляции на ранних стадиях. В таблице 6 обобщены результаты всех измеренных параметров, рассмотренных в настоящем исследовании, с критическими

замечаниями относительно их диагностических преимуществ и ограничений. Данные результаты подчёркивают необходимость включения измерений ЧР наряду с оценкой ДП для более комплексного анализа состояния изоляции генератора. Использование только ДП может привести к пропуску критических дефектов изоляции и, как следствие, к возникновению внезапных отказов. Таким образом, настоящее исследование подтверждает важность диагностики ЧР как необходимого инструмента мониторинга состояния электрических машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. M. Farahani, H. Borsi, and E. Gockenbach. "Experience with partial discharge, dissipation factor, and recovery voltage measurements for the evaluation of insulation systems of high voltage rotating machines". 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE 2002, pp 454-457.
2. M. Farahani, H. Borsi, E. Gockenbach, A. Bethge, M. Kaufhold and J. Jong, "Investigation on Characteristic Parameter to Determine the Actual Status of Insulation System for High Voltage Rotating Machines", The 9th International Electrical Insulation Conference, INSUCON 2002, Berlin.
3. S. Jiancheng, Y. Bo, X. Hengkun, "New estimating techniques for multi-stress ageing test of large generator stator winding insulation". ICPADM 2000, Session p. pp 951-956.
4. P. Mraz, P. Treyer, S. Gonzales, S. Azer. " Simultaneous Dissipation Factor and Partial Discharge Measurement on Rotating Machines – Limitations, Challenges, Solutions". International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Jeju, South Korea, 2014, CMD 2014.
5. M. Farahani, H. Borsi, and E. Gockenbach, M. Kaufhold. "Partial Discharge and Dielectric Response Behaviour of Insulation Systems for High Voltage Rotating Machines under Electrical Stress". 2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE 2004, pp 271-274.

6. T.K., Nurubeyli, J.I., Zeynalov, G.N., Mammadova, N.E. Imamverdiyev, "Improving methods for sample preparation of transformer oils by ICP-MS" International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, vol. 16, № 58, pp. 21–26, 2024,
7. Yuanlin Luo, Zhaohui Li, Hong Wang, "A Review of Online Partial Discharge Measurement of Large Generators", MDPI Energies, October 2017.
8. IEC 60034-27-3, "Rotating Electrical Machines - Part 27-3: Dielectric Dissipation Factor Measurement On Stator Winding Insulation Of Rotating Electrical Machines", 2015, Geneva, Switzerland.
9. H. Sedding, "Dissipation Factor Acceptance Criteria for Stator Winding Insulation", 19th Annual Iris Power Conference, June 2016, Scottsdale, Arizona.
10. IEC 60270: "High-voltage test techniques – Partial discharge measurements" 2015, Geneva, Switzerland.
11. T.K., Nurubeyli, A.M., Hashimov, N.E., Imamverdiyev, G.N. Mammadova, "Complex physicochemical analysis of transformer oil parameters using the inductively coupled plasma mass spectrometry technique" Electrical Engineering and Electromechanics, № 2, pp. 79–84, 2025
12. IEC 60034-27-1, "Rotating Electrical Machines - Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation", 2017, Geneva, Switzerland
13. IEC 60034-27-2, "Rotating Electrical Machines - Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines", 2012, Geneva, Switzerland
14. OMICRON electronics GmbH "Omicron CP CR600 User Manual" 2019. Klaus, Austria.
15. G.A. Hussain, W. Hassan, F. Mahmood, M. Shafiq, H. Rehman, J.A. Key, "Review on Partial Discharge Diagnostic Techniques for High Voltage Equipment in Power Systems" IEEE Access 2023. doi/10.1109/ACCESS.2023.3279355.
16. S. Barrios, D. Buldain, M.P. Comech, I. Gilbert, I. Orue, "Partial Discharge Classification Using Deep Learning Methods—Survey of Recent Progress", MDPI Energies, June 2019.
17. Yu-chen Liu, Tzu-Yu Liu, Tien-Heng Huang, Kuo-Chuang Chiu, Shih-kang Lin, "Exploring Dielectric Constant and Dissipation Factor of LTCC Using Machine Learning", MDPI Materials, June 2021.
18. I. Ismayilov "Study of Partial Discharge Propagation Impact on Stator Dissipation Factor in High Voltage Turbine Generator" International Conference on Management and Control in Solving Engineering Problems MaCoSEP, March 2025, Baku, Azerbaijan.

YÜKSƏK GƏRGİNLİKLİ FIRLANAN AVADANLIQLARDA QİSMİ BOŞALMA AKTİVLİYİNİN İNKİŞAFININ QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ ZAMANI DİELEKTRİK İTKİLƏR BUCAĞININ TANGENSİNİN ÖLÇÜLMƏSİNİN DİAQNOSTİK MƏHDUDİYYƏTLƏRİ

İsmayıl İSMAYİLOV

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti

E-mail: Ismail1098ismailov@gmail.com

Xülasə: Turbo-generatorlar kimi yüksək gərginlikli fırlanan avadanlıqların stator izolyasiyasının etibarlılığı onların uzunmüddətli və təhlükəsiz istismarının təmin olunması baxımından mühüm şərtidir. Ən geniş tətbiq olunan diaqnostik metodlara dielektrik itkilər bucağının tangensinin ($\tan \delta$) ölçülməsi və qismli boşalmaların (QB) ölçülməsi daxildir. Hazırkı tədqiqatda 2023–2024-cü illər ərzində güc generatoru üzərində əldə olunmuş sahə məlumatları əsasında qeyd olunan iki parametrlə arasındakı qarşılıqlı əlaqə araşdırılır. Dielektrik itkilər bucağının tangensi göstəricilərində yalnız cüzi artım müşahidə olunmasına baxmayaraq, qismli boşalma aktivliyində əhəmiyyətli yüksəlmə qeydə alınmışdır ki, bu da izolyasiyanın deqradasiyasının ilkin mərhələsinə işarə edir. Əldə edilmiş nəticələr göstərir ki, yalnız dielektrik itkilər bucağının tangensi göstəricisindən istifadə olunması inkişaf etməkdə olan qüsurların etibarlı şəkildə aşkarlanması üçün kifayət etməyə bilər və izolyasiyanın vəziyyəti ilə bağlı risklərin düzgün qiymətləndirilməməsinə səbəb ola bilər. Bunun əksinə olaraq,

qismi boşalma ölçmələri izolyasiya sisteminin vəziyyətində baş verən zəif pisləşmə əlamətlərinə qarşı daha yüksək həssaslıq nümayiş etdirmişdir. Tədqiqat yalnız dielektrik itkilər bucağının tangensinin ölçülməsinə əsaslanan yanaşmanın məhdudiyətlərini vurğulayır və qismi boşalmaların təhlilinin müntəzəm diaqnostika proqramına daxil edilməsinin əhəmiyyətini təsdiq edir. Hər iki metodun birgə tətbiqi izolyasiyanın vəziyyətinin daha dəqiq və vaxtında qiymətləndirilməsini təmin edir. Bu yanaşma yüksək gərginlikli fırlanan elektrik maşınlarında qəfil imtinaların qarşısının alınması və faktiki texniki vəziyyətə əsaslanan texniki xidmət strategiyalarının təkmilləşdirilməsi baxımından mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

Açar sözlər: yüksək gərginlik, qismi boşalmalar, dielektrik itkilər bucağının tangensi, stator izolyasiyası, güc generatorları, prediktiv texniki xidmət, YTCT sensorları.

DIAGNOSTIC LIMITATIONS OF DISSIPATION FACTOR MEASUREMENT IN ASSESSING THE DEVELOPMENT OF PARTIAL DISCHARGE ACTIVITY IN HIGH-VOLTAGE ROTATING EQUIPMENT

Ismayil ISMAYİLOV

Azerbaijan State Oil and Industry University

E-mail: Ismail1098ismailov@gmail.com

Abstract: The reliability of stator insulation in high-voltage rotating equipment, such as turbogenerators, is a critical prerequisite for ensuring long-term and safe operation. Among the most widely used diagnostic methods are dissipation factor measurement, expressed as the tangent of the dielectric loss angle ($\tan \delta$), and partial discharge (PD) measurement. This study examines the relationship between these two parameters based on field data obtained from a power generator during 2023–2024. Although the dissipation factor values increased only slightly, partial discharge activity rose significantly, indicating the early stage of insulation degradation. The obtained results demonstrate that relying solely on the dissipation factor may be insufficient for the reliable detection of developing defects and may lead to an underestimation of risks associated with the insulation condition. In contrast, partial discharge measurements showed higher sensitivity to minor signs of deterioration in the insulation system. The study highlights the limitations of an approach based exclusively on dissipation factor measurement and confirms the importance of incorporating partial discharge analysis into regular diagnostic programs. The combined application of both methods provides a more accurate and timely assessment of insulation conditions. This approach is significant for preventing unexpected failures and improving condition-based maintenance strategies for high-voltage rotating electrical machines.

Keywords: high voltage, partial discharge, dissipation factor, stator insulation, power generators, predictive maintenance, HFCT sensors.