

УДК 629.423.31

Диагностика изоляции тяговых электродвигателей по интенсивности частичных разрядов

М. А. Шрайбер

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Шрайбер М. А. Диагностика изоляции тяговых электродвигателей по интенсивности частичных разрядов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 967–974. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-967-974

Аннотация

Цель: Мониторинг состояния, включающий диагностику и прогнозирование неисправностей тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов, давно привлекает внимание исследователей. Фактически правильная диагностика и раннее обнаружение зарождающихся неисправностей приводят к быстрому обслуживанию и короткому простою локомотива в сервисном депо. В статье рассматривается возможность применения диагностики изоляции ТЭД за счет анализа интенсивности частичных разрядов.

Методы: В последние годы было проведено значительное количество исследований по созданию новых методов мониторинга состояния ТЭД, устраняющих недостатки традиционных методов диагностики технического состояния. В частности, происходит переход от методов планово-предупредительного ремонта к ремонту по фактическому техническому состоянию. При реализации этого подхода роль технической диагностики значительно возрастает.

В статье выполнен анализ полученных экспериментальных данных по изменению интенсивности частичных разрядов при диагностировании состояния изоляции ТЭД. **Результаты:** Идеальная процедура диагностики должна включать минимальный набор измерений, необходимых для оценки состояния машины. На основе анализа этих данных следует формировать диагноз, позволяющий: сделать вывод о текущем состоянии оборудования; своевременно выявить зарождающиеся режимы отказа за минимально возможное время. В результате проведенных исследований установлено, что токи частичного разряда отсутствуют ниже определенного начального напряжения. При этом некоторая степень нелинейности градации нагрузки может наблюдаться даже при значениях напряжения ниже данного порога.

Практическая значимость: Снижение затрат на техническое обслуживание и предотвращение незапланированных простоев локомотивов является приоритетным направлением работы изготовителей и эксплуатационников. Использование современных систем мониторинга и диагностики ТЭД позволяет выработать рациональные предложения по совершенствованию конструкции электрических машин локомотивов, а также повышению их надежности в эксплуатации.

Ключевые слова: Тяговый электродвигатель, изоляция, частичные разряды, надежность электрических машин, диагностика тяговых электродвигателей.

Введение

Обнаружение дефектов в работающем тяговом электродвигателе (ТЭД) на ранней стадии их развития не только предупредит внезапную остановку локомотива в результате аварии, но и значительно снижает расходы на ремонт и увеличивает срок его службы. Кроме этого, в настоящее время достаточно актуально применение адаптивных устройств защиты и диагностики, позво-

ляющих выполнять диагностику ТЭД независимо от их мощности и конструкции. Диагностика ТЭД должна проводиться неразрушающими методами контроля, однозначно связанными с физико-механическими свойствами его компонентов, что исключает нанесение вреда оборудованию.

Многие типы диагностических измерений широко используются для оценки технического состояния изоляции ТЭД, однако сложность ее

конструкции, а также процессов старения и разрушения делает каждый метод просто дополнительным индикатором ее состояния. К сожалению, в настоящее время нет инструмента, который надежно предупреждал бы о точном моменте наступления отказа. Также отсутствуют средства, позволяющие точно прогнозировать, как долго изоляция будет выдерживать заданные напряжения и нагрузки без разрушения.

Системы изоляции ТЭД подвергаются многочисленным испытаниям и диагностическим измерениям при проектировании и изготовлении, перед поставкой, при установке и в течение всего срока службы. Результаты используются для проверки пригодности изоляции, оптимизации планирования эксплуатации и технического обслуживания ТЭД или обнаружения предполагаемого дефекта. Методы диагностики могут быть улучшены за счет любой комбинации следующих факторов: повышения вероятности выявления важной проблемы, снижения вероятности ее пропуска, сокращения времени измерений или уменьшения капитальных затрат на используемое оборудование.

Проблемы диагностики, прогнозирования и принятия решений сложны для изучения. Реальные условия эксплуатации ТЭД различаются, отказы нельзя надежно предсказать на основе моделей процессов старения и износа. Ускоренные испытания изоляции являются лишь аппроксимацией эффектов в процессе эксплуатации, а хорошие данные о сроке ее службы для реального старения к естественному отказу трудно получить. Хорошая система для диагностических или прогностических результатов не просто выберет какие-то правила и оставит их, но воспользуется опытом, полученным во время ее использования, чтобы рассмотреть возможность корректировки этих правил.

1. Исследование частичных разрядов

Полное описание физического явления ионных разрядов в газовой среде, хотя и представ-

ляет научный интерес, выходит за рамки данной работы. Основное внимание здесь уделяется эффектам старения изоляции, поддающимся измерению или оценке. Возникновение частичных разрядов в воздушном кармане изоляции между двумя проводниками обусловлено электрическим полем, замыкающимся через дефект. Это поле усиливается геометрией самого дефекта и наличием заряженных частиц [1, 2].

Частичные разряды не являются обязательным критерием оценки качества изоляционного материала ТЭД тепловозов при приемочных испытаниях [3], однако они имеют большое значение для контроля изоляции в течение всего срока ее службы. При приемочных испытаниях возможны небольшие частичные разряды, что не обязательно свидетельствует о неудовлетворительном состоянии изоляционного материала.

Частичный разряд — это кратковременный разряд малой мощности в виде искры, замыкающей лишь часть промежутка между изоляцией и проводником или корпусом [4, 5]. Он возникает в полостях и на поверхностях изоляции обмоток, а также в изоляции лобовых частей. Поскольку это кратковременное явление, частичный разряд не приводит к немедленному выходу из строя ТЭД и не повреждает материал изоляции (см. рис. 1).

Необходимо фиксировать количество частичных разрядов внутри машины и анализировать их. Рост активности разрядов со временем (увеличение числа импульсов и их амплитуды) свидетельствует о старении изоляции обмотки. Это позволяет заблаговременно оценить степень ухудшения ее состояния — задолго до катастрофического внезапного отказа. При этом сбор данных возможен без прерывания работы электрической машины [6].

В дополнение к испытаниям на старение были выполнены измерения частичных разрядов, чтобы связать полученные данные и сформировать четкое представление об активности частичных разрядов в изоляции ТЭД [7, 8].

Установка для регистрации частичных разрядов включает:

- испытательный комплект;
- высоковольтный источник переменного тока 0–20 кВ (Trek 20/20);
- детектор частичных разрядов (IDAX 300).

Уровень шума в лаборатории при измерениях составлял менее 3 пКл (рис. 2). В режиме осциллографа для дальнейшего анализа записывались синусоидальные зависимости питающего напряжения и активности частичных разрядов [9].

Для регистрации частичных разрядов в материале изоляции сначала подавали испытательное переменное напряжение 1 кВ частотой 60 Гц на обмотку, при этом зубцовая зона была заземлена.

Выбор синусоидальной формы для стареющих систем изоляции был обоснован тем, что довольно сложно аналитически воспроизвести электрическое ограничение, вызванное быстро-действующими преобразователями, поскольку процесс включает переменные времена нарастания и значения dU/dt , перенапряжения, рабочие циклы и изменения полярности. Более того, синусоидальная форма напряжения позволяет учесть, что влияние стационарных частичных разрядов на высокой частоте смягчается из-за их меньшего количества. В результате старение при синусоидальном или прямоугольном напряжении дает одинаковые результаты для заданных величины напряжения и частоты [2].

Синусоидальное напряжение удобно не только для расчета размеров экспериментальной установки, но и для интерпретации и экстраполяции

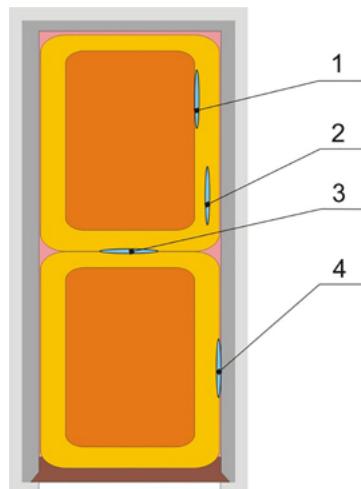


Рис. 1. Места возможного возникновения частичных разрядов:

- 1 — граница «проводник — изоляция»;
- 2 — внутри изоляции;
- 3 — граница секций;
- 4 — граница «изоляция — сердечник»

результатов, полученных на высокой частоте, на любые другие частоты. Однако требуются дополнительные исследования, чтобы глубже понять срок службы изоляционных систем — в частности, особенности старения под действием прямоугольного напряжения на низкой частоте. Также необходимо оценить, можно ли распространить полученные результаты на другие электрические машины.

Когда используется синусоидальное переменное напряжение, обнаруженные импульсы частичных разрядов могут быть обработаны с помощью анализа с фазовым разрешением, а установленная связь между шаблоном с фазовым разрешением и конкретным типом частичного разряда может быть использована для выявления слабости системы изоляции образца. Если, напротив, переменное напряжение пода-

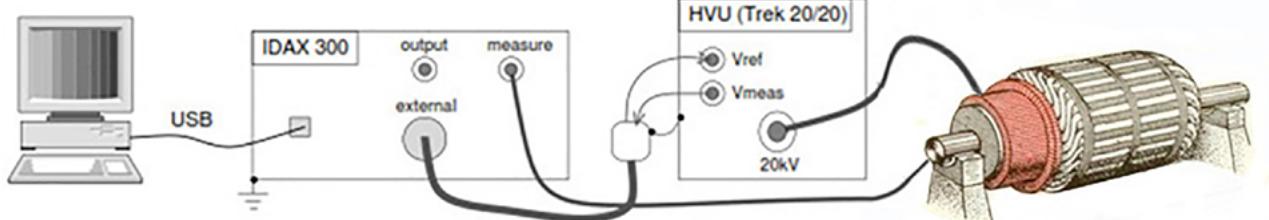


Рис. 2. Экспериментальная платформа для обнаружения частичных разрядов

ется непосредственно на образец обмотки, полученная информация очень ограничена, даже если регистрируются импульсы частичных разрядов. Без знания типа произошедших частичных разрядов будет сложно провести теоретический и статистический анализ собранных импульсов частичных разрядов [10].

Основная цель испытания частичных разрядов — подтвердить, что в системе изоляции отсутствуют какие-либо действия частичных разрядов при данном уровне испытательного напряжения. Случаи частичного разряда имеют тенденцию исчезать ниже определенной величины напряжения, это будет означать, что системы изоляции не подвержены или почти не подвержены частичным разрядам [2]. В связи с этим возникают вопросы о необходимости проведения испытаний на старение в присутствии частичных разрядов.

На рис. 3 представлены результаты регистрации частичных разрядов в изоляции опытного образца — в исходном состоянии и после 500 термоциклов нагружения (N_i — количество термоциклов) при напряжении питания 1 кВ.

Из рис. 3 видно, что результаты измерения частичных разрядов (красная линия) отличаются от типичных зарегистрированных изображений. Типичные картины частичного разряда, наблюдаемые в большинстве машин, происходят в четко определенных диапазонах частот в первом и третьем квадрантах синусоидальной волны напряжения питания частотой 60 Гц (зеленая линия). Качество получаемых данных не очень хорошее, они скорее напоминают внешний шум, поэтому отличить шумовые импульсы от импульсов частичных разрядов сложно [11].

Внешние помехи, вероятно, будут иметь тот же частотный спектр, что и эти частичные разряды. Это связано с тем, что блок формирования сигнала отфильтровывает все внешние помехи за пределами полосы пропускания 30–300 кГц. Из спектра принятого сигнала можно сделать вывод, что шум может быть вызван статическим преобразователем мощности, подключенным к той же линии электропередачи. На самом деле испытательного напряжения в 1 кВ недостаточно, чтобы вызвать устойчивый частичный разряд в материале изоляции ТЭД.

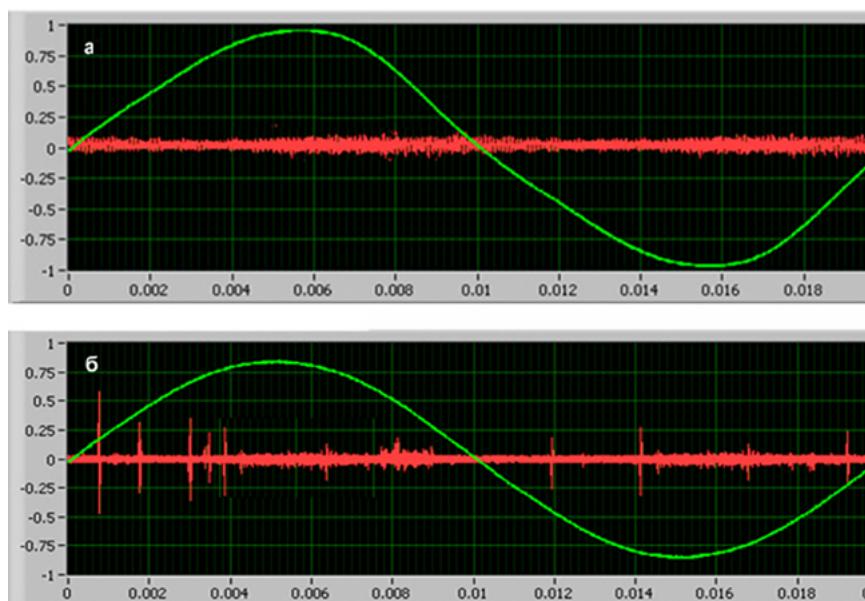


Рис. 3. Осциллограммы регистрации частичного разряда при 1,0 кВ:
 $a — N_i = 0; b — N_i = 500$

На рис. 4 приведена осциллограмма типового процесса регистрации частичных разрядов без фильтрации в изоляции опытного образца при напряжении питания 5 кВ частотой 60 Гц переменного тока в исходном состоянии и после 500 термоциклов нагружения.

Данные частичных разрядов в обмотке, полученные в этом случае, имеют значительное сходство с типичной картиной разряда, характерной для большинства вращающихся электрических машин [6]. Наблюдаются незначительные различия в формах сигналов, полученных в обоих случаях. Основная причина заключается в том, что они относятся к разным циклам.

На рис. 4 источники частичных разрядов при визуальном осмотре имеют относительно малую величину мощности и охватывают большую площадь с относительно стабильными величинами. Некоторые импульсы частичного разряда имеют относительно большую амплитуду. Эти большие частичные разряды имеют тенденцию возникать в узком окне анализа с фазовым разрешением перед положительным пиком, а также перед отрицательным пиком напряжения питания.

Визуальный анализ данных о частичных разрядах остается наиболее распространенным методом мониторинга состояния изоляции высоковольтных электродвигателей. Однако для полноценной интерпретации информационного содержания таких сигналов требуются значительные опыт и знания. При этом визуальный анализ частичных разрядов не может считаться надежным индикатором состояния изоляции электродвигателей с напряжением питания менее 1 кВ [6].

Традиционные методы калибровки частичных разрядов неприменимы к ТЭД тепловозов, поскольку их уровень измеряется не в месте фактического возникновения, а на клеммах обмотки. Обмотки каждого ТЭД отличаются и по-разному влияют на импульсы частичного разряда — особенно когда они возникают в спрятанной в пазах части обмотки.

Место возникновения частичных разрядов напрямую влияет на величину сигнала, регистрируемого на клеммах электрической машины. Импульс частичного разряда затухает при прохождении через обмотку. Поэтому частичный разряд с меньшей амплитудой может отобра-

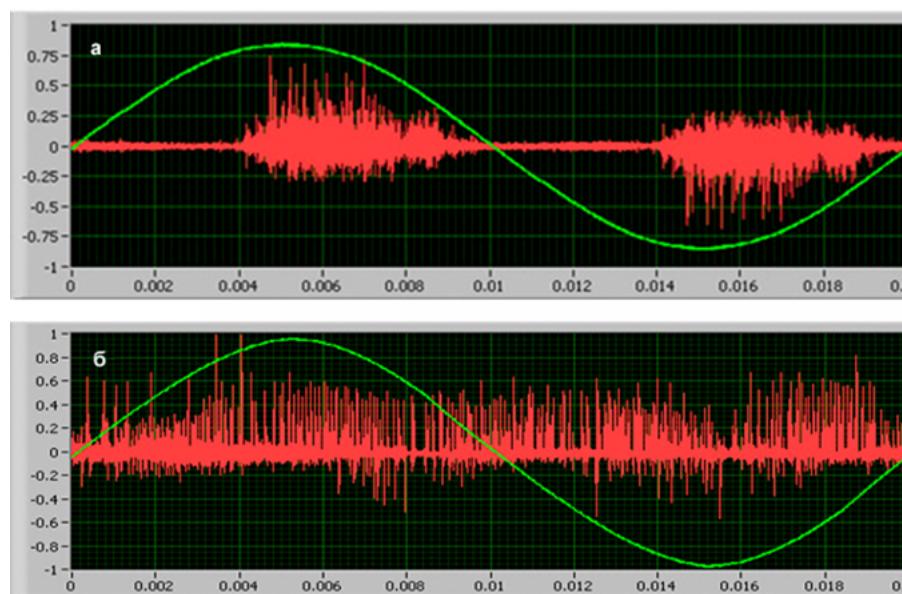


Рис. 4. Осциллограммы регистрации частичного разряда при 5,0 кВ:

$a — N_i = 0; b — N_i = 500$

жаться на клеммах сильнее, чем более мощный, но расположенный дальше от точки регистрации — и наоборот.

Промышленный опыт показывает: некоторые электрические машины демонстрируют значительные уровни частичных разрядов, которые остаются стабильными в течение длительного времени и могут сохраняться годами без ущерба для изоляции. В то же время другие машины показывают небольшие значения частичных разрядов, постепенно увеличивающиеся со временем — это сигнализирует о наличии механизма отказа, влияющего на изоляцию [5].

Следовательно, для каждой электрической машины требуется индивидуальная калибровка: подается импульс известной амплитуды и измеряется энергия частичного разряда. Отсюда следует, что анализ, основанный исключительно на величине частичных разрядов, не может считаться надежным для оценки состояния изоляции ТЭД.

Анализ полученных при экспериментальных исследованиях данных показал, что характер изменения частичных разрядов при диагностировании изоляции ТЭД нельзя использовать как основной показатель ее состояния из-за низкого рабочего напряжения. Использование более высоких испытательных напряжений может привести к электрическому повреждению изоляции ТЭД. Поэтому наличие частичного разряда можно использовать лишь как дополнительное подтверждение заключения о техническом состоянии его изоляции.

Выводы

В ходе исследований установлено: токи частичного разряда отсутствуют ниже определенного начального напряжения. При этом некоторая степень нелинейности градации нагрузки может наблюдаться и при более низких значениях.

Возможность возникновения частичного разряда в конце градации напряжения при низ-

ких частотах и рабочих напряжениях, вероятно, не имеет практического значения как признак повреждения изоляции ТЭД. В экспериментах на модельных образцах при частоте 60 Гц такие разряды не зафиксированы.

Список источников

1. Кучинский Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г. С. Кучинский. — Л.: Энергия, 1979. — 224 с.
2. Montanari G. C. Accelerated aging, partial discharges and breakdown of Type II turn-to-turn insulation system of rotating machines / G. C. Montanari, A. Cavallini, F. Ciani, A. Contin // IEEE Electrical Insulation Conference. — Jun. 2016. — Pp. 190–193.
3. ГОСТ 2582—2013. Машины электрические врашающиеся тяговые. Общие технические условия. Принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации 5 ноября 2013 г. № 61-П. — Введен в действие с 1 января 2015 г. — Официальное издание. — М.: Издательство стандартов, 2014. — 67 с.
4. Поляков Д. А. Исследование характеристик частичных разрядов в искусственных дефектах линий электропередачи / Д. А. Поляков, Н. А. Терещенко, И. В. Комаров, К. И. Никитин и др. // Омский научный вестник. — 2020. — № 6(174). — С. 63–68.
5. Candela R. Diagnosis of HV capacitive insulators by partial discharge measurements / R. Candela, R. Schifani // IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. — 2001. — Kitchener, Ontario, Canada. — Pp. 365–368.
6. Abadie C. Partial discharges in motor fed by inverter: from detection to winding configuration / C. Abadie, T. Billard, T. Lebey // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2018. — Pp. 1–10.
7. ГОСТ 20074—83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 15 апреля 1983 г. № 1961. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 22 с.
8. ГОСТ IEC/TS 60034-27-2—2015. Измерения частичного разряда на изоляции статорной обмотки включенных в сеть вращающихся электрических машин / Принят Межгосударственным советом по стан-

дартизации, метрологии и сертификации 29 ноября 2015 г. № 80-П. — Москва: Стандартинформ, 2016. — 49 с.

9. Руссов В. А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / В. А. Руссов. — М.: Энергия, 2011. — 370 с.

10. Вдовико В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В. П. Вдовико. — Новосибирск: Наука, 2007. — 155 с.

11. Галушко А. И. Надежность изоляции электрических машин / А. И. Галушко, И. С. Максимова,

Р. Г. Оснач, П. М. Хазановский. — М.: Энергия, 1979. — 175 с.

Дата поступления: 11.10.2025

Решение о публикации: 14.11.2025

Контактная информация:

ШРАЙБЕР Марина Александровна — канд. техн. наук, доц.; goshapti4ka@yandex.ru

Diagnostics of Traction Motor Insulation by Partial Discharge Measuring Method

M. A. Shrayber

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Shrayber M. A. Diagnostics of Traction Motors Insulation by Partial Discharge Measurement // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 967–974. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-967-974

Summary

Purpose: Monitoring the condition of traction electric motors (TEM) in locomotives involves diagnosing and predicting malfunctions. This has been a subject of a great amount of research. Accurate diagnoses and early detection of potential issues lead to timely maintenance and reduce downtime of locomotives at depots. This paper explores the use of TEM insulation diagnostics by analyzing partial discharge intensity. **Methods:** In recent years, a significant amount of research has been conducted to create new methods for monitoring the condition of TEM, addressing the shortcomings of traditional diagnostic techniques. Specifically, there is a shift from scheduled preventive maintenance to maintenance based on the actual operating condition of the equipment. The implementation of this approach significantly enhances the role of technical diagnostics. This paper presents an analysis of the experimental data obtained regarding changes in the partial discharge intensity during the diagnosis of the TEM insulation condition. **Results:** An ideal diagnostic procedure should include the essential measurements required to assess the condition of the machine. Based on the analysis of the data obtained, a diagnosis should be formed that enables an evaluation of the current state of the equipment, the timely identification of emerging failure modes in the shortest possible time. The research has shown that partial discharge currents are absent below a specific initial voltage. However, a certain degree of nonlinearity in the load gradation may still be observed even at voltage levels below this value. **Practical significance:** Reducing maintenance costs and preventing unplanned downtime of locomotives is a priority for manufacturers and operators. The implementation of advanced monitoring and diagnostics systems for traction electric motors will enable the development of rational proposals for improving the design of electric locomotives and enhancing their reliability during operation.

Keywords: Traction electric motor, insulation, partial discharges, reliability of electric machines, diagnostics of traction electric motors.

References

1. Kuchinskiy G. S. *Chastichnye razryady v vysokovol'nykh konstruktsiyakh* [Partial discharges in high-voltage structures]. Leningrad: Energiya Publ., 1979, 224 p. (In Russian)
2. Montanari G. C., Cavallini A., Ciani F., Contin A. Accelerated aging, partial discharges and breakdown of Type II turn-to-turn insulation system of rotating machines. IEEE Electrical Insulation Conference, Jun. 2016, pp. 190–193.
3. *GOST 2582—2013. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Prinyat Mezhdunarodnym sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii 5 noyabrya 2013 g. № 61-P. Vveden v deystvie s 1 yanvarya 2015 g. Ofitsial'noe izdanie* [Rotating electric traction machines. General technical conditions. Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification on November 5, 2013, No. 61-P. Effective since January 1, 2015. Official publication]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 2014, 67 p. (In Russian)
4. Polyakov D. A., Tereshchenko N. A., Komarov I. V., Nikitin K. I. et al. Issledovanie kharakteristik chasticchnykh razryadov v iskusstvennykh defektakh liniy elektroperedachi [Investigation of partial discharge characteristics in artificial defects of power transmission lines]. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2020, Iss. 6(174), pp. 63–68. (In Russian)
5. Candela R., Schifani R. Diagnosis of HV capacitive insulators by partial discharge measurements. IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001, Kitchener, Ontario, Canada, pp. 365–368.
6. Abadie C., Billard T., Lebey T. Partial discharges in motor fed by inverter: from detection to winding configuration. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, pp. 1–10.
7. *GOST 20074—83. Elektrooborudovanie i elektroustrojstva. Metod izmereniya kharakteristik chasticchnykh razryadov. Utverzhden i vveden v deystvie Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po standartam ot 15 aprelya 1983 g. № 1961* [Electrical equipment and installations. Method for measuring partial discharge characteristics. Approved and put into effect by Resolution of the USSR State Standards Committee of April 15, 1983, No. 1961]. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1983, 22 p. (In Russian)
8. *GOST IEC/TS 60034-27-2—2015. Izmereniya chasticchnogo razryada na izolyatsii statornoy obmotki vklyuchennykh v set' vrashchayushchikhsya elektricheskikh mashin. Prinyat Mezhdunarodnym sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii 29 noyabrya 2015 g. № 80-P* [Measurements of partial discharge on the insulation of the stator winding of energized rotating electrical machines. Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification on November 29, 2015, No. 80-P]. Moscow: Standartinform Publ., 2016, 49 p. (In Russian)
9. Russov V. A. *Izmerenie chasticchnykh razryadov v izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya* [Measurement of partial discharges in the insulation of high-voltage equipment]. Moscow: Energiya Publ., 2011, 370 p. (In Russian)
10. Vdoviko V. P. *Chasticchnye razryady v diagnostirovaniyu vysokovol'tnogo oborudovaniya* [Partial discharges in diagnostics of high-voltage equipment]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2007, 155 p. (In Russian)
11. Galushko A. I., Maksimova I. S., Osnach R. G., Khazanovskiy P. M. *Nadezhnost' izolyatsii elektricheskikh mashin* [Reliability of electrical machine insulation]. Moscow: Energiya Publ., 1979, 175 p. (In Russian)

Received: October 11, 2025

Accepted: November 14, 2025

Author's information:

Marina A. SHRAYBER — PhD in Engineering, Associate Professor; goshapti4ka@yandex.ru