

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-61-68>

УДК 621.3.048.015

## Особенности измерения частичных разрядов в системах изоляции статорных обмоток высоковольтных электрических машин

Андреев А. М.<sup>\*1</sup>, Азизов А. Ш.<sup>1</sup>, Андреев И. А.<sup>2</sup>, Смирнов А. Н.<sup>1</sup>, Степанов А. А.<sup>1</sup>, Назаров Г. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «Силовые машины»

Московский пр., 139, 196105, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ул. Политехническая, 29, 195251, г. Санкт-Петербург, Россия

Поступила / Received 25.01.2021

Принята к печати / Accepted for publication 02.03.2021

Цель статьи — представить потенциальные инструменты, которые могут внести значительный вклад в идентификацию частичных разрядов (ЧР). Различные типы частичных разрядов действуют в системе изоляции статорной обмотки одновременно. Внутренние частичные разряды — это электрические разряды, которые возникают в пустотах в изоляции обмотки статора. В типичных системах изоляции статора, в которых используются слюдяные ленты, склеенные эпоксидной смолой, ухудшение изоляции из-за внутренних частичных разрядов обычно происходит медленно (многие годы или десятилетия). Внешние частичные разряды (пазовые ЧР и поверхностные ЧР в лобовой области статорной обмотки) более опасны и приводят к разрушению изоляции в короткий срок (несколько месяцев или лет). Поэтому идентификация дефектов изоляции имеет важное значение. Проведен анализ существующих методов идентификации дефектов изоляции высоковольтных электрических машин с использованием результатов измерения характеристик частичных разрядов. Охарактеризованы достоинства и недостатки каждой из групп методов идентификации. Показано, что среди моделей представления знаний при решении задач диагностирования систем изоляции высоковольтных электрических машин одними из наиболее подходящих являются методы идентификации, включающие натурные испытания с применением обучающих выборок. Отмечено, что выявление дефектов изоляции и их идентификация не могут быть осуществлены только прямыми измерениями характеристик ЧР и других диэлектрических параметров (электрического сопротивления, индекса поляризации диэлектрических потерь). Для этого должны использоваться специальные вычислительные программы, основанные на методах распознавания образов. Представлены результаты определения технологических дефектов изоляции статорной обмотки на этапе заводских испытаний, полученные с использованием разработанной авторами методики идентификации ЧР.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** статорная обмотка, система электрической изоляции, дефект, частичный разряд, распознавание образов

### Адрес для переписки:

Андреев А. М.

АО «Силовые машины»

Московский пр., 139, 196105, г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: [andreev\\_am@power-m.ru](mailto:andreev_am@power-m.ru)

### Address for correspondence:

Andreev A. M.

JSC «Power Machines»

139, Moscovsky pr., St.Petersburg, 196105, Russia

e-mail: [andreev\\_am@power-m.ru](mailto:andreev_am@power-m.ru)

### Для цитирования:

Андреев А. М., Азизов А. Ш., Андреев И. А., Смирнов А. Н., Степанов А. А., Назаров Г. А. Особенности измерения частичных разрядов в системах изоляции статорных обмоток высоковольтных электрических машин. *Надежность и безопасность энергетики*. 2021. – Т. 14, №1. – С. 61–68.

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-61-68>

### For citation:

Andreev A. M., Azizov A. Sh., Andreev I. A., Smirnov A. N., Stepanov A. A., Nazarov G. A. [Particularities of measuring partial discharges in stator windings insulation systems of high-voltage electrical machines]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2021, vol. 14, no. 1, pp. 61–68 (in Russian).

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-61-68>

# Particularities of measuring partial discharges in stator windings insulation systems of high-voltage electrical machines

Andreev A. M.<sup>1</sup>, Azizov A. Sh.<sup>1</sup>, Andreev I. A.<sup>2</sup>, Smirnov A. N.<sup>1</sup>, Stepanov A. A.<sup>1</sup>, Nazarov G. A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> JSC "Power Machines"

1139, Moscovsky pr., St. Petersburg, 196105, Russia

<sup>2</sup> Sankt-Petersburg Polytechnic University Peter Great

29, Polytechnicaya st., St. Petersburg, 195251, Russia

The purpose of the article is to provide potential tools that can make a significant contribution to the identification of partial discharges (PD). Different types of partial discharges occur in stator winding insulation and a few partial discharges may occur simultaneously. Internal partial discharges are electrical discharges that occur in voids in the insulation of the stator winding. In typical stator insulation systems that use epoxy bonded mica tapes, insulation degradation due to internal partial discharges is usually slow (many years or decades). External partial discharges (slot PD and surface PD in the end-winding) are more dangerous and lead to the destruction of the insulation in a short time (several months or years). Therefore, the identification of insulation defects is essential. The analysis of existing methods for identification of defects in the insulation of high-voltage electrical machines using the results of measuring the partial discharges characteristics is carried out. The advantages and disadvantages of each of the groups of identification methods are characterized. It is shown that among the models of knowledge representation in solving problems of diagnostics of insulation systems for high-voltage electrical machines, identification methods, including field tests using training samples, are among the most suitable ones. It is noted that detection of insulation defects and their identification cannot be carried out only by direct measurements of PD characteristics and other dielectric parameters (electrical resistance, dielectric loss, polarization index). For this, special computing programs based on pattern recognition methods should be used. Results are presented of identification of technological defects in the insulation of the stator winding at the stage of factory testing, obtained using the PD identification method developed by the authors.

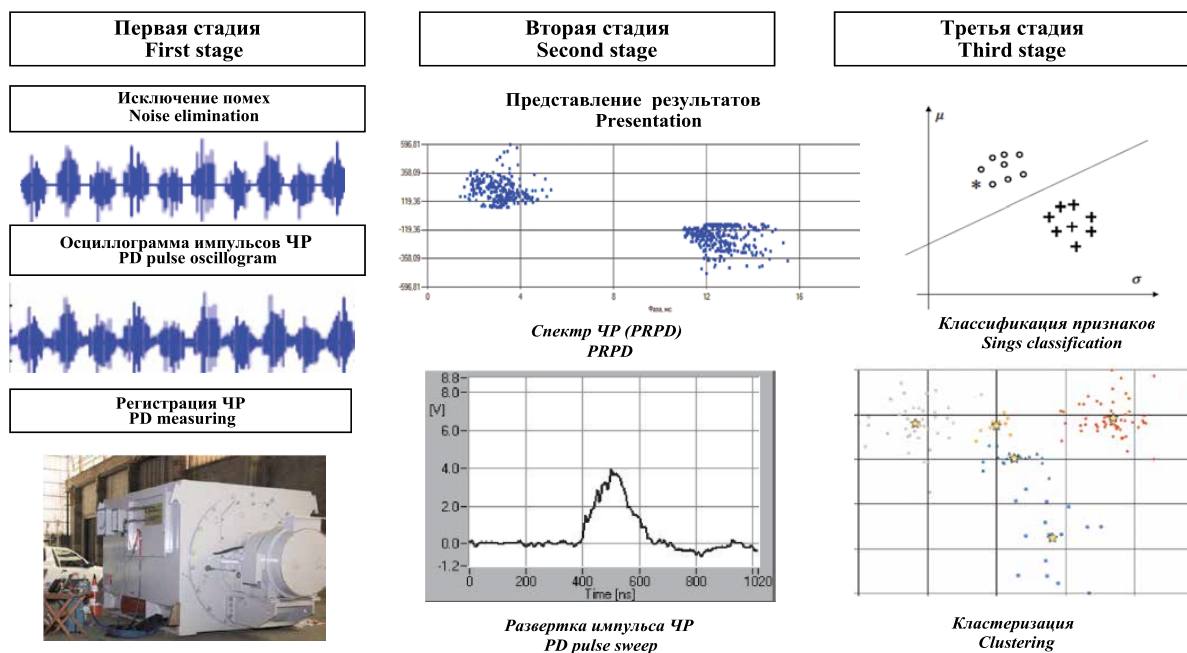
KEYWORDS: stator winding, electrical insulation system, defect, partial discharge, pattern recognition

Частичные разряды (ЧР) в системах изоляции статорной обмотки высоковольтных электрических машин возникают под действием высокой напряженности электрического поля в местах пониженной электрической прочности. Они представляют собой либо пробой газовых включений внутри изоляции, либо местные электрические разряды в газе по поверхности твердого диэлектрика и на этой основе разделяются на внутренние и внешние ЧР. Отказ системы электрической изоляции за счет действия ЧР происходит не мгновенно и, в первую очередь, определяется типом и местом их возникновения. Время от возникновения первичных ЧР до полного пробоя изоляции в большинстве зафиксированных случаев составляет от нескольких недель до десятков лет, при этом наиболее опасными типами являются некоторые внешние ЧР, в частности, пазовые. Таким образом, характеристики и типы ЧР являются важными диагностическими признаками, что дает возможность обнаруживать опасные технологические дефекты на стадии заводских приемо-сдаточных испытаний, а также планировать и осуществлять оптимальное финансирование ремонтных работ.

Следует учитывать, что в отличие от других диагностических методов, основанных на измерениях электрических параметров (диэлектрических потерь, абсорбционных характеристик и т. д.), регистрация характеристик ЧР может выявлять наиболее опасные типы ЧР, что обуславливает преимущество этого метода. Необходимым условием для этого является разра-

ботка эффективного алгоритма и программы идентификации дефектов изоляции по характеристикам ЧР, которые в настоящее время отсутствуют в мировой практике и поэтому не могут быть использованы в заводских условиях. Мероприятия по разработке подобных методов могут быть реализованы только на основе использования знаний в области системного анализа, теоретической электротехники и техники высоких напряжений. Кроме того, существенное влияние на разработку методов контроля оказывает эффективность разработанного программного обеспечения, наличие возможности его технической реализации и доступность метрологических средств. В мировой практике ведутся работы по созданию методик оценки степени дефектности различных типов электромашиной изоляции по характеристикам ЧР и определению остаточного ресурса системы электрической изоляции машины [1–5].

В системах изоляции электрических машин измерения ЧР проводятся в режимах «off-line» посредством подачи испытательного напряжения от высоковольтных установок промышленной или пониженной частоты (при заводских приемо-сдаточных испытаниях или на станциях в ремонтные периоды) или «on-line» на работающем оборудовании. Оптимально выполненный процесс регистрации и представления результатов измерения характеристик ЧР в системе изоляции электрических машин должен включать три последовательных стадии (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Структурная схема регистрации и представления результатов измерения ЧР  
**Figure 1.** Block diagram of the registration and presentation of the results of PD measurement

Согласно Стандарту МЭК 60270 регистрация ЧР в индивидуальных элементах обмотки (стержнях, катушках) и в собранных статорных обмотках электрических машин, обычно проводится электрическим методом с применением измерительных схем с включением измерительного импеданса измерительного устройства (ИУ) в ветвь заземления соединительного конденсатора (емкостного датчика). К первой стадии испытаний относится операция отстройки от электрических помех. В зависимости от типа используемого ИУ эта операция выполняется либо инструментально (с использованием полосовых фильтров или линий задержки) [6], либо с помощью программной поддержки в процессе обработки результатов измерений [4, 7].

В настоящее время традиционным (принятым) способом представления результатов измерений ЧР яв-

ляются так называемые точечные амплитудно-фазовые спектры (PRPD) [8]. На второй стадии испытаний в результате математической обработки этих спектров определяются количественные характеристики ЧР, основными из которых являются максимальный кажущийся заряд ( $q_{\max \text{ ЧР}}$ ) и напряжение возникновения ( $U_{\text{нЧР}}$ ). Эти характеристики определяют интенсивность электроразрядной активности, однако не дают информацию о типах и реальной опасности зарегистрированных ЧР. Поэтому важной задачей испытаний (третья стадия) является распознавание видов ЧР, возникающих в изоляции, для выявления дефектов, возникающих за счет нарушений технологического процесса, а также оценки степени старения системы изоляции.

Существующие в мировой практике способы распознавания дефектов изоляции по характеристикам

**Таблица 1.** Методики распознавания дефектов изоляции по характеристикам ЧР

**Table 1.** Recognition methods of insulation defects according to the PD characteristics

Принцип распознавания Recognition principles	Инструменты Tools	Недостатки Disadvantages
Экспертные оценки интегральных характеристик ЧР и особенностей формы амплитудно-фазовых спектров ЧР Expert estimates of the PD integral characteristics and the shape of the PD amplitude-phase spectra (PRPD)	Анализ интегральных характеристик ЧР. Визуальная сравнительная оценка спектров ЧР Analysis of the PD integral characteristics. Visual comparative evaluation of PRPD	Отсутствие количественных критериев. Низкий уровень идентификации за счет субъективной оценки Lack of quantitative criteria. Low level of identification due to subjective assessment
Анализ формы индивидуальных импульсов ЧР и закономерностей их возникновения Analysis of the shape of individual PD impulses and the laws of their occurrence	Преобразование Фурье, Вейвлет. TW-карты Fourier Transform, Wavelet. TW-maps	Выраженные зависимости формы импульсов ЧР от передаточных характеристик ИУ и местоположения ЧР Expressed dependencies of the PD pulse shape on the transfer characteristics of the measuring device and the PD location
Анализ статистических параметров амплитудно-фазовых спектров ЧР Analysis of the statistical parameters of the PRPD	Кластерный, дискриминантный анализ. Искусственные нейронные сети Cluster, discriminant analysis. Artificial Neural Networks	Выраженная зависимость качества идентификации от качества обучающей выборки The pronounced dependence of the quality of identification on the quality of the training sample

ЧР условно можно разбить на три группы (таблица 1):

- методики, основанные на экспертных оценках интегральных параметров и особенностей спектров ЧР;
- методики, основанные на анализе формы и закономерностей возникновения и следования индивидуальных импульсов ЧР;
- методики, основанные на анализе статистических характеристик спектров ЧР.

В первой, наиболее традиционной группе методик в качестве характеристических признаков распознавания используются значения  $q_{\text{макс ЧР}}$ ,  $U_{\text{нЧР}}$ , либо индивидуальные особенности спектров ЧР. Используются также интегральные характеристики, определяющие интенсивность разрядов в течение интервала времени, значительно большего, чем время между двумя единичными, следующими один за другим ЧР (частота следования, средний ток, средняя мощность и квадратичный параметр). Для упрощения используется также сравнительный визуальный анализ и выявление характерных особенностей амплитудно-фазовых спектров ЧР [2]. Спектры различных типов ЧР отличаются формой, а также соотношением положительных и отрицательных импульсов. По этим показателям можно выделить ряд четко выраженных дефектов — источников ЧР в системах изоляции электрических машин [2]. Дополнительными критериями оценки формы амплитудно-фазовых спектров ЧР могут являться факторы внешних воздействий на систему изоляции (уровень электрической нагрузки, рабочая температура, влажность и др.). В таблице 2 приведены сводные данные по идентификации дефектов (источников ЧР) в системах изоляции электрических машин с использованием вида и параметров амплитудно-фазовых спектров ЧР (полярность, фазы появления максимумов положительных и отрицательных импульсов) и эмпирических зависимо-

стей характеристик ЧР от воздействующих факторов.

Очевидно, что использование характеристических признаков спектров ЧР, приведенных в таблице 2, информативно при наличии в изоляции единичных дефектов одинаковой природы. Наличие двух или более разнотипных дефектов (например, внутрислойные отслоения в корпусной изоляции и дефекты в лобовой части статорной обмотки) может кардинально изменить образ амплитудно-фазовых спектров ЧР, сделав при этом практически невозможным идентификацию источников ЧР. Разумеется, такой подход не может обеспечить высокий уровень экспертной оценки, тем не менее, он активно используется рядом компаний, которые пропагандируют такой упрощенный подход, позволяющий работать в полевых и станционных условиях техническому персоналу, прошедшему минимальное обучение.

Во второй группе представлены методы, в которых при идентификации дефектов в изоляции используются различные математические способы анализа формы индивидуальных импульсов ЧР. Для спектрального представления последовательности импульсов ЧР применяются преобразования Фурье, вейвлет, Хаара и Уолша и др. Наиболее широко используемое при анализе ЧР [2, 4, 8], преобразование содержит два компонента: эквивалентное время ( $T$ ) и эквивалентная площадь пропускания ( $W$ ):

$$T^2 = \frac{\sum_{i=1}^K (t_i - t_0)^2 s_i(t_i)^2}{\sum_{i=1}^K s_i(t_i)^2}, \quad (1)$$

где  $K$  — количество импульсов ЧР,  $t_i$  — время возникновения  $i$ -го импульса,  $s_i$  — амплитуда  $i$ -го импульса и

**Таблица 2.** Параметры амплитудно-фазовых спектров ЧР, характеризующие типы дефектов в изоляции высоковольтных электрических машин

**Table 2.** Parameters of PRPDs characterizing the types of defects in the insulation of high-voltage electrical machines

Тип дефекта Type of defect	Полярность спектра PRPD polarity	Фаза начала ЧР, град The inception phase of PD, degrees	Влияние температуры Temperature effect	Влияние Нагрузки Power effect
Расслоение корпусной изоляции Delamination of main insulation	Не обнаружено Not detected	45/225	Отрицательный эффект Negative effect	Не обнаружено Not detected
Плохое качество пропитки, газовые поры Poor impregnation, micro voids	Не обнаружено Not detected	45/225	Отрицательный эффект Negative effect	Не обнаружено Not detected
Ослабление статорной обмотки Stator winding attenuation	Положительная полярность Positive	45/-	Отрицательный эффект Negative effect	Увеличение интенсивности ЧР с ростом нагрузки Increase of PD intensity with increasing load
Загрязнение поверхности лобовой части обмотки Surface contamination of the end winding	Не обнаружено Not detected	15/195 75/225	Положительный эффект Positive effect	Не обнаружено Not detected
Уменьшение межфазового промежутка в лобовой части Reducing the interphase gap in the end winding	Не обнаружено Not detected	15/195 75/225	Не обнаружено Not detected	Не обнаружено Not detected

$t_0$  — центр распределения импульсов ЧР по времени их возникновения:

$$t_0 = \frac{\sum_{i=1}^K t_i s_i(t_i)^2}{\sum_{i=1}^K s_i(t_i)^2}, \quad (2)$$

$$W^2 = \frac{\sum_{i=1}^K f_i^2 |X_i(f_i)|^2}{\sum_{i=1}^K |X_i(f_i)|^2}, \quad (3)$$

где  $f_i$  — частота импульса ЧР,  $X_i(f_i)$  —  $i$ -ый компонент импульса, определяемый исходя из быстрого Фурье-преобразования.

Каждый импульс ЧР может быть представлен в виде точки в двумерных координатах ( $TW$ -карта) следующим образом. Импульсам ЧР, относящимся к одному дефекту (источнику ЧР), будут соответствовать точки на  $TW$ -карте, которые близки друг к другу, соответственно, импульсы ЧР, относящиеся к другим дефектам, будут производить отдельные и отличные группы точек (кластеры) на  $TW$ -карте. Когда несколько кластеров отображаются на  $TW$ -карте, то каждый кластер представляет группу импульсов ЧР, имеющих одинаковую форму. Обычно, эти группы могут определять происхождение различных ЧР или источников помех, что позволяет их разделять и отстраиваться от помех, которые являются главными проблемами при «on-line» мониторинге изоляции вращающихся машин. Тем не менее, следует учитывать, что при применении классификационных  $TW$ -карт необходимо иметь в виду, что форма единичного импульса ЧР, в первую очередь, определяется характеристиками измерительных систем, а именно шириной полосы пропускания ИУ. Кроме того, такого рода информация зависит от передаточной функции измерительного устройства, а также от взаимного месторасположения дефекта (источника сигнала ЧР) и датчика регистратора. В общем случае, импульсы ЧР подвергаются эффекту затухания, в зависимости от потерь в среде передачи сигнала, эффекту искажения из-за комплекса емкостных и индуктивных соединительных явлений, и эффекту отражения из-за изменения сопротивления бегущей волны от исследуемого объекта вдоль пути распространения. Таким образом, форма единичного импульса ЧР связана с измерительной цепью и расположением источников рядов в испытуемом объекте, поэтому использование различных ИУ с различными передаточными функциями измерительных каналов может привести к несопоставимым результатам при идентификации дефектов.

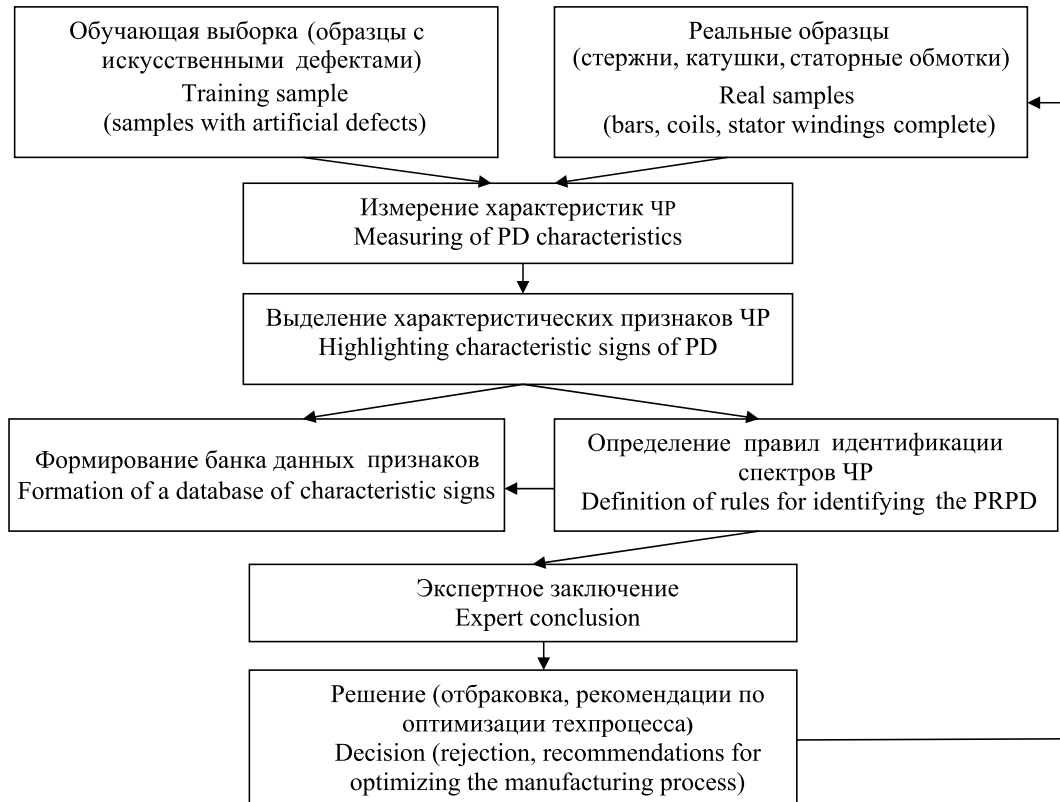
К третьей группе относятся методы, использующие для распознавания дефектов так называемые искусственные нейронные сети (ИНС) (многослойные прямого распространения и рекуррентные с обратной связью (Хопфилда), а также самоорганизующиеся (Кохонена)). Начальным этапом работы любой ИНС явля-

ется «самообучение», т. е. подбор таких значений ее весов, чтобы сеть работала нужным образом. Обучение ИНС, предназначенных для распознавания источников ЧР, производится с использованием модельных образцов единичных искусственных дефектов, спектры ЧР в которых имеют свои характерные признаки. Входными параметрами в этих случаях могут являться идентификационные признаки амплитудно-фазовых спектров ЧР (коэффициенты асимметрии и эксцесса, фрактальные размерности, параметры распределения Вейбулла и т. д.) [9, 10]. В результате «самообучения» ИНС, каждый нейрон в выходном слое должен соответствовать определенному источнику ЧР.

К этой же группе относятся методы распознавания дефектов, основанные на кластерном и дискриминационном анализе, которые аппроксимируют границы между кластерами ЧР линейными функциями. Такие методы в отличие от методов, использующих ИНС, характеризуются быстройдействием и высокой наглядностью представления результатов и поэтому нашли применение на этапе сдаточных испытаний в заводских условиях при оценке качества изготовленной изоляции и последующей коррекцией технологических процессов. Для установления канонических дискриминантных функций при определении границ кластеров для каждого типа ЧР (внутренние в газовых порах и отслоениях, пазовые и поверхностные в лобовых областях) в этих методах используются характеристические признаки амплитудно-фазовых спектров ЧР. Для этого формируется обучающая выборка, состоящая из оптимального набора модельных образцов, в каждом из которых создавался единичный искусственный дефект, где реализовывалась возможность возникновения ЧР определенной разновидности. При изготовлении модельных образцов должны использоваться материалы и технологические процессы, традиционно используемые для изготовления электрической изоляции статорных обмоток в заводских условиях.

Для практической реализации аппаратно-программного комплекса по распознаванию дефектов изоляции статорной обмотки электрических машин по характеристикам ЧР была разработана автоматизированная система, реализующая алгоритм, представленный на рисунке 2. Алгоритм состоит из нескольких основных этапов, которые включают в себя разработку конструкции и изготовление модельных образцов, образующих обучающую выборку; регистрацию характеристик ЧР в виде амплитудно-фазовых спектров и выделение их характеристических признаков; формирование базы данных и, как итог, принятие экспертного решения.

Основным этапом, определяющим эффективность алгоритма, является расчет и извлечение характеристических признаков спектров ЧР. Существенное условие здесь состоит в том, что признаки должны различаться между различными источниками ЧР, также же, как и первоначальные амплитудно-фазовые спектры. Размерность признакового пространства максимально минимизируется в результате преобразования трехмерного 3D-амплитудно-фазового спектра ЧР в двумерные  $(q_{\text{ЧРmax}} - \varphi)$ ;  $(q_{\text{ЧРср}} - \varphi)$ ;  $(n_{\text{ЧР}} - \varphi)$



**Рисунок 2.** Алгоритм методики распознавания технологических дефектов в изоляции статорной обмотки электрических машин на стадии заводских испытаний

**Figure 2.** An algorithm for the recognition of technological defects in the stator winding insulation of the electrical machines at the factory test

2D-распределения (рисунок 3).

При этом сокращается количество требуемых измерений и увеличивается статистическая устойчивость результатов распознавания. Повышение качества распознавания достигается использованием основных статистических признаков трансформированных 2D-распределений и дополнительных признаков, определяющих взаимное расположение импульсов ЧР на положительном и отрицательном полупериодах испытательного напряжения. К основным признакам относятся коэффициенты асимметрии по фазе возникновения ( $\Phi_\varphi$ ;  $\Phi_{cp}$ ;  $\Phi_{max}$ ), количеству импульсов ЧР разной полярности ( $Q$ ):

$$\Phi_\varphi = \frac{(\varphi_{max}^- - \varphi_{min}^-) - (\varphi_{max}^+ - \varphi_{min}^+)}{\tau}, \quad (4)$$

$$\Phi_{cp} = \frac{\varphi_{cp}^-}{\tau} - \frac{\varphi_{cp}^+}{\tau}, \quad (5)$$

$$\Phi_{max} = \frac{\varphi_{max}^-}{\tau} - \frac{\varphi_{max}^+}{\tau}, \quad (6)$$

$$Q = \frac{\sum q_i^- / \sum n_i^-}{\sum q_i^+ / \sum n_i^+} \quad (7)$$

В качестве дополнительных характеристических признаков используются коэффициенты корреляции ( $CC_{qcp}$ ;

$CC_{qmax}$ ;  $CC_N$ ) для соответствующих распределений:

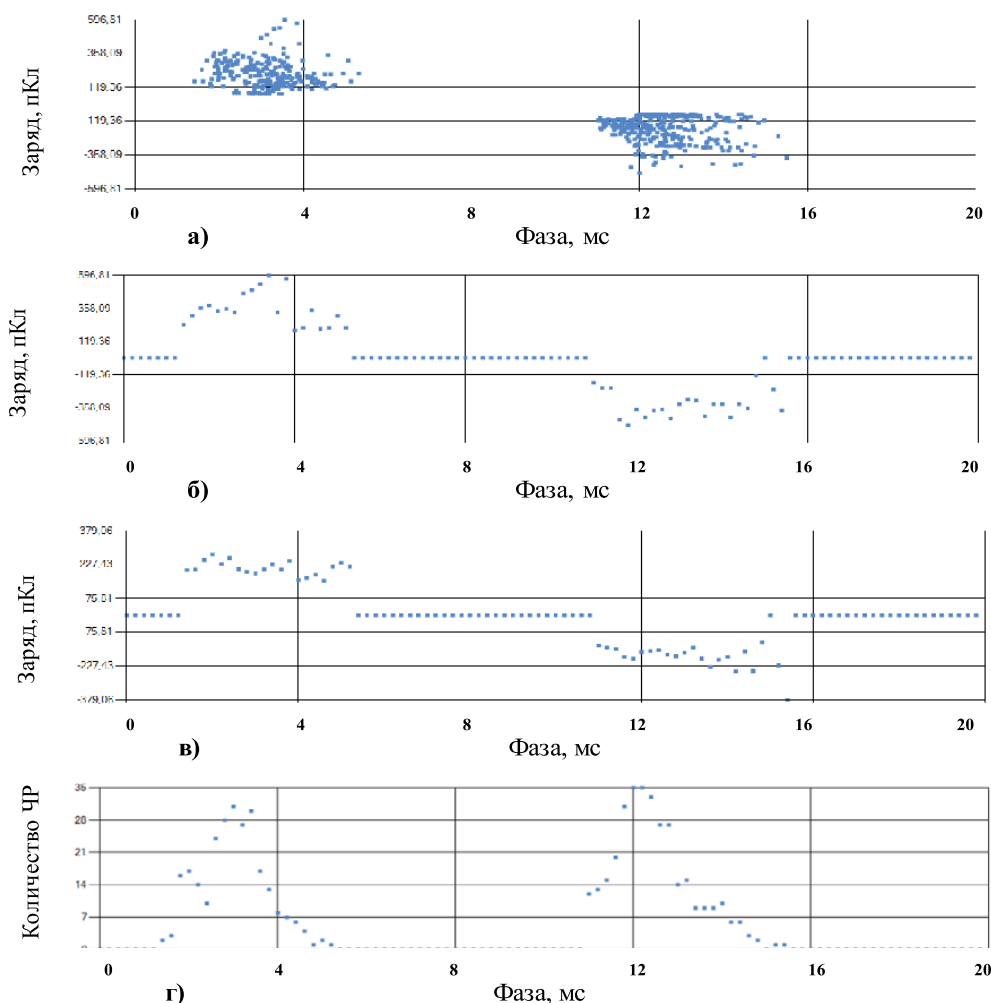
$$CC_{Q_{cp}} = \frac{\sum (q_{cp}^+ - \bar{q}_{cp}^+) (q_{cp}^- - \bar{q}_{cp}^-)}{\sqrt{(q_{cp}^+ - \bar{q}_{cp}^+)^2 (q_{cp}^- - \bar{q}_{cp}^-)^2}}, \quad (8)$$

$$CC_{Q_{max}} = \frac{\sum (q_{max}^+ - \bar{q}_{max}^+) (q_{max}^- - \bar{q}_{max}^-)}{\sqrt{(q_{max}^+ - \bar{q}_{max}^+)^2 (q_{max}^- - \bar{q}_{max}^-)^2}}, \quad (9)$$

$$CC_N = \frac{\sum (N^+ - \bar{N}^+) (N^- - \bar{N}^-)}{\sqrt{(N^+ - \bar{N}^+)^2 (N^- - \bar{N}^-)^2}}, \quad (10)$$

где индексы – и + относятся к параметрам спектров ЧР соответствующей полярности,  $\tau$  — продолжительность полупериода приложенного испытательного напряжения.

Формирующаяся таким образом база данных используется для установления канонических дискриминантных функций при определении границ кластеров для каждого типа обучающих ЧР. Качество разработанных решающих правил распознавания оценивается по контрольной выборке, в которую входят модельные экзаменационные образцы с известными по геометрическим размерам и расположению дефектами, а также реальные образцы статорной изоляции (стержни, катушки, статорная обмотка в сборе) на этапе сдаточных испытаний. Выделение классов источников ЧР проводится путем нахождения линейной комбинации дис-



**Рисунок 3.** Пример преобразования трехмерного 3D-амплитудно-фазового спектра ЧР (а) в двумерные  $(q_{\text{ЧРmax}} - \varphi)$  (б);  $(q_{\text{ЧРср}} - \varphi)$  (в);  $(n_{\text{ЧР}} - \varphi)$  (г) 2D-распределения

**Figure 3.** An example of transformation of a three-dimensional 3D-amplitude-phase spectrum of PD (a) into two-dimensional  $(q_{\text{PD max}} - \varphi)$  (б);  $(q_{\text{PD av}} - \varphi)$  (в);  $(n_{\text{PD}} - \varphi)$  (г) 2D distribution

криминантных переменных, которая оптимально разделяет рассматриваемые модели:

$$d_{km} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1km} + \dots + \beta_p \cdot x_{pkm}, \quad (11)$$

где  $d_{km}$  — значение канонической дискриминантной функции для  $m$ -го объекта в группе  $k$  ( $m = 1, \dots, n$ ,  $k = 1, \dots, g$ );  $x_{pkm}$  — значение дискриминантной переменной

**Таблица 3.** Результаты идентификации технологических дефектов системы изоляции статорной обмотки

**Table 3.** The results of the identification of technological defects of the stator winding insulation system

Модель идентификации Identification model	Размер обучающей выборки, шт The size of the training sample, pcs	Размер проверочной выборки, шт The size of the test sample, pcs	Доля правильно определенных дефектов, % The proportion of correctly identified defects,%
Разработанная New	76	142	87
Традиционная Traditional	76	142	64

$X_i$  для  $m$ -го объекта в группе  $k$ ;  $\beta_0, \dots, \beta_p$  — коэффициенты дискриминантной функции.

В таблице 3 приведены результаты идентификации технологических дефектов изоляции статорных стержней (расслоения корпусной изоляции, протяженные газовые поры) с использованием разработанной методики.

Таким образом, показано, что использование разработанной математической модели амплитудно-фазовых спектров ЧР позволило увеличить эффективность разработанной распознающей системы, предназначенной для идентификации единичных технологических дефектов изоляции (микropоры в корпусной изоляции, отслоения, поверхностные разряды в лобовой зоне) в процессе приемосдаточных заводских испытаний, более чем на 20%.

## Выводы

1. Анализ современных результатов по измерениям характеристик ЧР

в системах изоляции высоковольтного оборудования показал необходимость выявления опасных типов технологических и износных дефектов для последующего использования этой информации для оптимизации технологического процесса, а также оценки остаточного ресурса изоляции.

2. Наиболее распространенные в мировой практике способы идентификации дефектов по характеристикам ЧР, использующие визуальный контроль амплитудно-фазовых спектров, должны быть дополнены объективными математическими программами, основанными на методах распознавания образов. Эффективность подобных программ может быть усилена использованием обучающей выборки, состоящей из макетных образцов, выполненных по заводской технологии с применением реальных конструкционных и электроизоляционных материалов.

3. Для выявления опасных технологических дефектов в компонентах статорной обмотки на этапе приемосдаточных испытаний рационально использовать методики идентификации, основанные на дискриминационном анализе характеристических признаков спектров ЧР, а в процессе эксплуатации электрической машины методики, использующие особенности формы индивидуальных импульсов ЧР (*TW*-карты).

#### Список использованных источников

1. Sedding H. G., Stone G. C., Warren V. Progress in interpreting on-line partial discharge test results from motor and generator stator windings. CIGRE 2016; Paris, A1-202.
2. Montanari G. C., Seri P. A Partial Discharge – Based health index for rotating machine condition evaluation. IEEE Elect. Insulation Magazine 2018; v. 34: 17–23.
3. Ramesh P., Sumangala B., Vishwanath A. Novel approach to identify slot discharges in the presence of end winding corona discharges. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2019; v. 26 (5): 1385–1393.
4. Montanari G. C., Seri P., Ghosh R., Cirioni L. Noise rejection and partial discharge source identification in insulation system under DC voltage supply. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2019; v. 26 (6): 1894–1902.
5. Tanaka K. Prediction of residual breakdown electrical field strength of epoxy-mica paper insulating systems for the stator winding of large generators. IEEE Transaction Dielectrics Electrical Insulation 2015; v. 22: 1118–1123.
6. Kunicki M., Cichoń A., Nagi L. Statistics based method for partial discharge identification in oil paper insulation systems. Electric Power Systems Research. 2018; v. 163 (B): 559–571.
7. Stone G. R. Objective methods to interpret partial-discharge data

on rotating-machine stator windings. IEEE Transaction on Industry Application 2016; v. 42 (1): 195–200.

8. Akbari A., Rahimi M., Werle P., Borsi H. Fault localization and analysis for a damaged hydrogenerator and a proposal to improve the standard for generator commissioning tests. IEEE Electrical Insulation Magazine 2019; v. 36 (3): 9–25.

9. Kunicki M., Cichon A. Application of a phase resolved partial discharge pattern analysis for acoustic emission method in high voltage insulation systems diagnostics. Archives of acoustics 2018; v. 43 (2): 235–243.

10. Deshpande A. Partial discharge source identification using phase window analysis of PRPD data. 19th International Symposium on High Voltage Engineering 2015; Plzen: 23–28.

#### References

1. Sedding H. G., Stone G. C., Warren V. Progress in interpreting on-line partial discharge test results from motor and generator stator windings. CIGRE 2016; Paris, A1-202. (In Eng.)
2. Montanari G. C., Seri P. A Partial Discharge – Based health index for rotating machine condition evaluation. IEEE Elect. Insulation Magazine 2018; v. 34: 17–23. (In Eng.)
3. Ramesh P., Sumangala B., Vishwanath A. Novel approach to identify slot discharges in the presence of end winding corona discharges. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2019; v. 26 (5): 1385–1393. (In Eng.)
4. Montanari G. C., Seri P., Ghosh R., Cirioni L. Noise rejection and partial discharge source identification in insulation system under DC voltage supply. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2019; v. 26 (6): 1894–1902. (In Eng.)
5. Tanaka K. Prediction of residual breakdown electrical field strength of epoxy-mica paper insulating systems for the stator winding of large generators. IEEE Transaction Dielectrics Electrical Insulation 2015; v. 22: 1118–1123. (In Eng.)
6. Kunicki M., Cichoń A., Nagi L. Statistics based method for partial discharge identification in oil paper insulation systems. Electric Power Systems Research 2018; v.163 (B): 559–571. (In Eng.)
7. Stone G. R. Objective methods to interpret partial-discharge data on rotating-machine stator windings. IEEE Transaction on Industry Application 2016; v. 42 (1): 195–200. (In Eng.)
8. Akbari A., Rahimi M., Werle P., Borsi H. Fault localization and analysis for a damaged hydrogenerator and a proposal to improve the standard for generator commissioning tests. IEEE Electrical Insulation Magazine 2019; v. 36 (3): 9–25. (In Eng.)
9. Kunicki M., Cichon A. Application of a phase resolved partial discharge pattern analysis for acoustic emission method in high voltage insulation systems diagnostics. Archives of acoustics 2018; v. 43 (2): 235–243. (In Eng.)
10. Deshpande A. Partial discharge source identification using phase window analysis of PRPD data. 19th International Symposium on High Voltage Engineering 2015; Plzen: 23–28. (In Eng.)

