

Николаев Ан.А.<sup>1,2</sup>, Храмшина Е.А.<sup>2</sup>, Николаев Ар.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРА СРЕДСТВАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Мониторинг технического состояния и определение мест возникновения неисправностей являются важнейшими задачами, обеспечивающими безаварийную работу технологических (печных) трансформаторов металлургических предприятий. Решение этих задач предопределяет актуальность внедрения диагностических систем и приборов, а также разработки способов и методик, обеспечивающих локализацию и идентификацию неисправностей. Показано, что решение этих задач наиболее эффективно обеспечивается средствами акустической локации частичных разрядов (ЧР) с последующим вычислением их интегральных характеристик. Разработан способ контроля состояния, включающий on-line мониторинг, осуществляемый стационарной системой, и периодическую акустическую локацию ЧР переносным прибором. Рассмотрен способ локализации неисправностей, основанный на определении координат разрядов в баке трансформатора и их математической обработке с использованием метода субтрактивной кластеризации. Приведен пример локализации конкретной неисправности трансформатора агрегата печь-ковш. Дано практическое подтверждение достоверности определения места ее возникновения. Даны рекомендации по обслуживанию трансформатора и дальнейшему применению полученных результатов.

**Ключевые слова:** печной трансформатор, техническое состояние, мониторинг, неисправность, локализация, способ, частичные разряды, акустическая локация, практическое применение, достоверность, подтверждение.

### ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный контроль технического состояния печных трансформаторов является необходимым условием безаварийной работы ответственных металлургических агрегатов: дуговых сталеплавильных печей и агрегатов печь-ковш (АПК). В связи с этим оснащение трансформаторов данного класса системами on-line мониторинга является актуальной и остро востребованной задачей [1]. В 2013 и 2014 гг. на трансформаторах ЭТЦНКВ – 40000/110-УХЛ-4 АПК-1 и АПК-2 электросталеплавильного цеха Магнитогорского металлургического комбината (ММК) внедрены системы мониторинга технического состояния. Они разработаны коллективом Магнитогорского государственного технического университета совместно со специалистами ММК и компании «Димрус» (г. Пермь). Их подробное описание представлено в публикациях [2-5].

Внедренные системы интегрированы в цеховую компьютерную сеть и выполняют контроль технического состояния, а также отдельные диагностические функции. Они обеспечивают вывод информации о контролируемых параметрах, автоматическое формирование журнала учета неисправностей, оповещение о предаварийных ситуациях [6, 7]. Данные системы находятся в эксплуатации и доказали свою эффективность, благодаря своевременному предупреждению опасного развития дефектов. По информации от этих систем в 2015 г. осуществлен внеплановый ремонт обоих трансформаторов. Это потребовало определенных затрат, но позволило предотвратить аварии, следствием которых могли стать длительные простои агрегатов и значительно большие затраты на устранение последствий.

Своевременное предотвращение аварий подтверждает эффективность работы диагностических систем в режиме «индикаторов неисправностей». Однако общим недостатком всех известных систем мониторинга является то, что они не позволяют определить место возникновения и характер неисправности (локализовать и идентифицировать неисправность).

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Опыт эксплуатации стационарных систем и применения переносных диагностических приборов показал, что единственным методом, который может обеспечить оперативную локализацию неисправностей трансформаторного оборудования без снятия напряжения, является метод акустической локации частичных разрядов. Появление ЧР вызвано тем, что полный пробой изоляции в условиях эксплуатации возникает не сразу. Как правило, ему предшествуют разряды, перекрывающие часть изоляционного промежутка, за что они и получили свое название. Увеличение интенсивности ЧР является сигналом зарождающейся неисправности, кроме того, сами ЧР вызывают разрушение изоляции. Такие разряды достигают контролируемого уровня уже на ранней стадии развития дефекта. Поэтому их возникновение и интенсивность являются важными диагностическими признаками, а метод контроля, основанный на регистрации ЧР, обладает высокой диагностической ценностью.

Дефекты, вызванные деструктивными процессами в изоляции (витковые замыкания, разрушение вследствие перегрева, механические повреждения и др.), имеют конкретное место возникновения в фазах обмоток либо высоковольтных вводах трансформатора. Они наиболее эффективно диагностируются путем регистрации интенсивности ЧР и оценки скорости ее увеличения. Главная проблема определения места возник-

новения неисправности связана со сложностью конструкции трансформатора и соответственно неоднородной средой, в которой распространяются ЧР.

Для количественной оценки интенсивности ЧР используются интегральные характеристики [8]:

1. *Кажущийся заряд*  $Q_{02}$  (нКл) – величина, количественно пропорциональная максимальной амплитуде импульса. Системы, эксплуатируемые на трансформаторах АПК ММК, настроены таким образом, что длительность импульса должна быть не более 640 нс при условии, что в течение последующих 2560 нс не должно быть импульсов амплитудой выше 30% первоначального импульса. В случае Графики мощностей ЧР в фазах А и В трансформатора АПК-2 если эти условия не выполняются, импульс считается помехой и не регистрируется. Импульсы ЧР считаются периодически повторяющимися, если частота их следования составляет 0,2 импульса за один период питающей сети. При использовании для регистрации ЧР практически всех известных приборов измеряется амплитуда, т.е. напряжение импульса  $U$  (мВ). Для определения кажущегося заряда используется зависимость  $Q_{02}=10 \cdot U_{02}$ , облегчающая настройку системы.

2. *Мощность ЧР*, ее чаще всего сводят к параметру PDI (*Partial Discharge Intensity*). Он характеризует мощность и интенсивность ЧР и определяется зависимостью

$$PDI = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m Q_i U_d,$$

где  $m$  – число регистрируемых импульсов за время наблюдения  $T$ ;  $U_d$  – действующее значение напряжения.

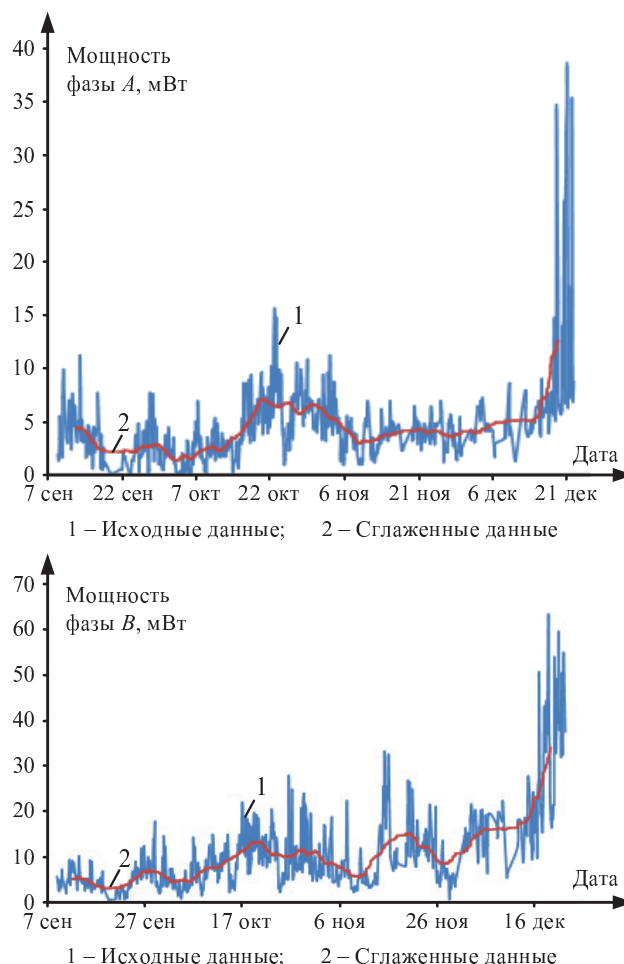
Наряду с фиксацией числовых параметров в системах on-line мониторинга формируются их временные зависимости (тренды). Это позволяет определить скорость развития и соответственно степень опасности неисправности. Примеры трендов характеристик ЧР, зафиксированные на трансформаторе АПК-2 в сентябре-декабре 2016 года, представлены на **рис. 1**. На графиках виден интенсивный рост разрядной активности во всех фазах в период после 15 декабря. Это говорит о развитии неисправности внутри трансформатора, однако место ее возникновения средствами установленной системы определить невозможно. Вследствие этого 23.12.2016 была произведена остановка агрегата пещков, после чего трансформатор был выведен в ремонт.

Приведенный пример подтверждает техническую эффективность применения регистрации ЧР для контроля текущего состояния объекта. При этом для локализации неисправности необходимо выделение в баке трансформатора зоны с повышенной разрядной активностью. Это требует применения приборов, фиксирующих пространственные координаты разрядов, и специальных методов их математической обработки.

#### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

##### Способ локации очагов ЧР

В результате проведенных исследований разработан способ контроля состояния и локализации неисправностей высоковольтного оборудования. Суть его заключается в комплексном применении on-line мониторинга технического состояния, осуществляемого стационарной системой, и периодической акустической локации ЧР с помощью переносных приборов.



**Рис. 1. Графики мощностей ЧР в фазах А и В трансформатора АПК-2**

Способ локализации неисправностей поясняется с помощью временных диаграмм, представленных на **рис. 2, а** [9]. Выявление очага осуществляется по разнице времени поступления импульсов на каждый из четырех датчиков, установленных на фиксированном расстоянии друг от друга.

Данный принцип реализован в приборах акустической локации ЧР марки AR-700, выпускаемых компанией «Димрус». Прибор регистрирует и загружает в память компьютера пространственные координаты ( $x_i, y_i, z_i$ ) каждого импульса, зафиксированного датчиками. Для математической обработки результатов периодических замеров в работах [10, 11] обосновано применение метода субтрактивной (горной) кластеризации. При этом в качестве элементов матрицы наблюдений предлагается использовать координаты каждого разряда.

Объемная схема, поясняющая локализацию участков с повышенной разрядной активностью, представлена на **рис. 2, б**. На ней условно показаны центры участков (кластеров) с высокой интенсивностью разрядных явлений. Анализ пространственного перемещения центров кластеров, а также динамики изменения их потенциалов позволяет дать оценку скорости развития неисправности.

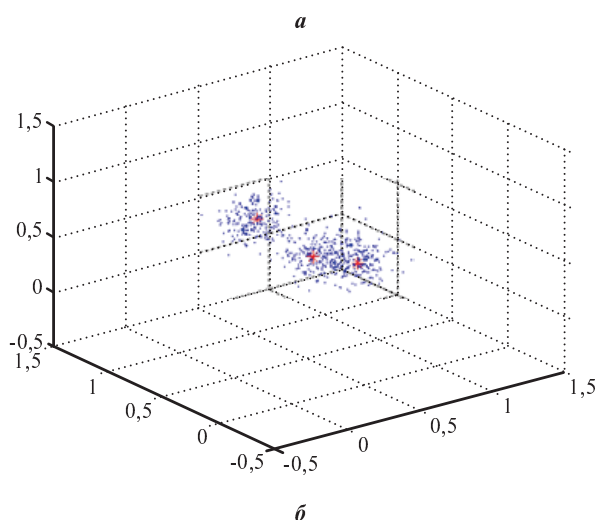
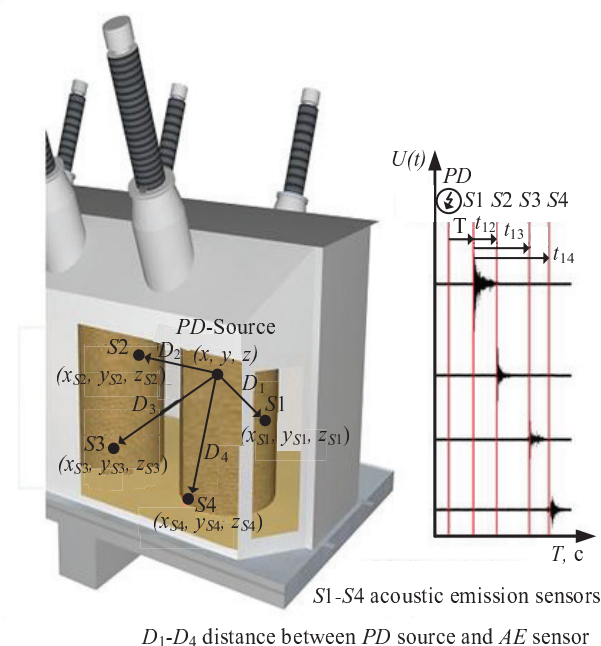


Рис. 2. Иллюстрация методов локализации источника ЧР и кластерного анализа (а) в трехмерных координатах (б)

Идентификацию неисправностей предложено осуществлять путем сопоставления центров кластеров с конструктивным расположением узлов трансформатора. Данный способ применен в разработанной универсальной системе мониторинга состояния силового трансформатора [12]. С помощью встроенного программного обеспечения обрабатывается информация об интенсивности, амплитудах, фазах и пространственных координатах импульсов ЧР. По результатам обработки определяются участки с наиболее высокой разрядной активностью. Поскольку частичные разряды являются признаками деструктивных процессов в изоляции, это позволяет определить место ее разрушения на ранней стадии.

#### Пример локализации неисправности

С целью определения места возникновения неисправности, развитие которой зафиксировано системой on-line мониторинга и представлено на рис. 1, проведены измерения активности ЧР. Замеры выполнялись с помощью прибора AR700, его вид представлен на рис. 3, а.



а



б

Рис. 3. Измерение ЧР прибором AR-700 (а – общий вид прибора; б – расположение акустических датчиков на поверхности бака)

Согласно методике проведения замеров, предварительно была обследована поверхность бака. В результате обнаружена зона повышенной разрядной активности, в районе которой установлены четыре акустических датчика. Датчики устанавливались по углам квадрата со стороной 300 мм с привязкой к «центру тяжести» трансформатора (рис. 3, б). В результате получены сигналы, пропорциональные амплитудам ЧР, и выполнено их спектральное разложение. На рис. 4, а представлены результаты замеров, проведенных 12.10.2016 (до обнаружения неисправности), полученные по одному измерительному каналу. Сигналы, поступающие с других акустических датчиков, имеют аналогичный характер. На рис. 4, б приведены аналогичные графики, зафиксированные после устранения неисправности.

При первоначальных обследованиях было обнаружено, что работающие маслососы системы охлаждения трансформатора приводят к сильному «зашумлению» сигналов, поступающих с датчиков (рис. 4, а). Поэтому последующие измерения (рис. 4, б) проводились при кратковременных отключениях маслососов.

Результаты обработки координат ЧР кластерным методом приведены в виде объемных изображений на рис. 5. С целью наглядности, в объемной зоне трансформатора выделен куб со стороной 1 м, что соответствует эффективной акустической локации. Для расчетов была использована скорость распространения звука в трансформаторном масле 1500 м/с. Были учтены координаты датчиков и разница во времени прихода импульсов. В результате получилось несколько вероятных очагов развития дефекта (центров кластеров), выделенных более темными точками внутри куба.

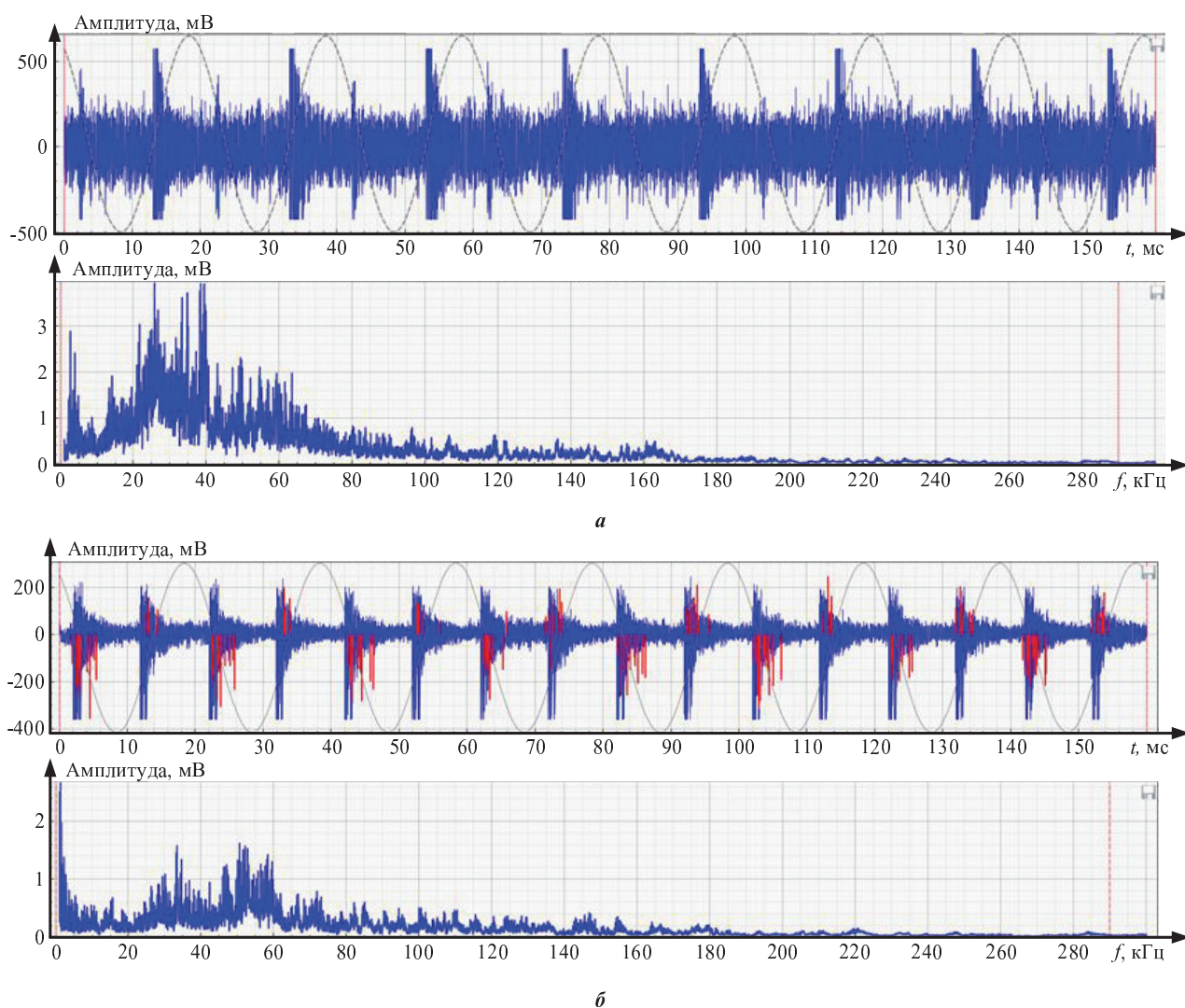


Рис. 4. Акустические сигналы с одного датчика и их спектральное разложение до (а) и после (б) устранения неисправности

После сопоставления центров кластеров с конструкцией трансформатора была обнаружена зона повышенной акустической активности в зоне фазы В высоковольтного ввода. Приблизительное место ее расположения находится на 360 мм правее и на 650 мм выше центра масс трансформатора (показано на рис. 5, а выносной линией). Ввиду сложной внутренней конструкции и большого числа отражений разрядов от внутренних поверхностей более точно определить глубину, на которой расположен поврежденный участок, не представляется возможным.

После частичной разборки трансформатора, проведенной в декабре 2016 г., был обнаружен дефект, показанный на рис. 6. Он связан с неправильным изгибом провода, соединяющего высоковольтный ввод с первичной обмоткой. В результате выводной конец фазы В обмотки высокого напряжения находился в непосредственной близости с острым углом пластины, приваренной к балке вольтодобавочного трансформатора. С учетом того, что разряды концентрируются на заостренных поверхностях, это оказалось наиболее вероятным местом возникновения разрядов. Именно этот дефект вызвал интенсивный рост ЧР, зафиксированный на рис. 1.

#### Анализ результатов

После устранения обнаруженной неисправности и ввода трансформатора в работу зафиксировано резкое снижение интенсивности ЧР во всех фазах. Это демонстрируют временные зависимости амплитуды и мощности ЧР в фазе В, представленные на рис. 7. Их сравнение с трендами на рис. 1 подтверждает достоверность выполненного диагностирования.

Для подтверждения результатов 27.01.2017 проведены повторные измерения ЧР в зоне, показанной на рис. 5, а. Графики акустических сигналов и их спектры приведены на рис. 4, б, результаты математической обработки – на рис. 5, б. Их анализ позволил сделать вывод: после проведенных ремонтных работ в зоне дефекта произошло значительное снижение разрядной активности. Усредненная мощность ЧР в фазе В снизилась в 2,5 раза.

Вместе с тем обнаружена зона повышенной разрядной активности, расположенная на 230 мм ниже места установки датчика №4 на глубине до 400 мм (см. рис. 5, б). Центр кластера обозначен точкой с выносной линией с указанием координат. Однако, как следует из графиков на рис. 7, уровень интенсивности ЧР и отсутствие их роста в данном случае не вызывают серьезных опасений. В результате были рекомендованы проведение учащенных обследований прибором AR-700 и постоянные наблюдения за показаниями стационарной системы.



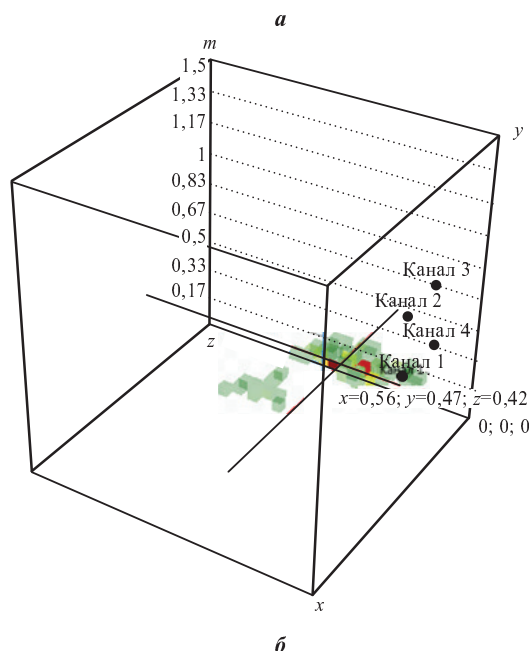
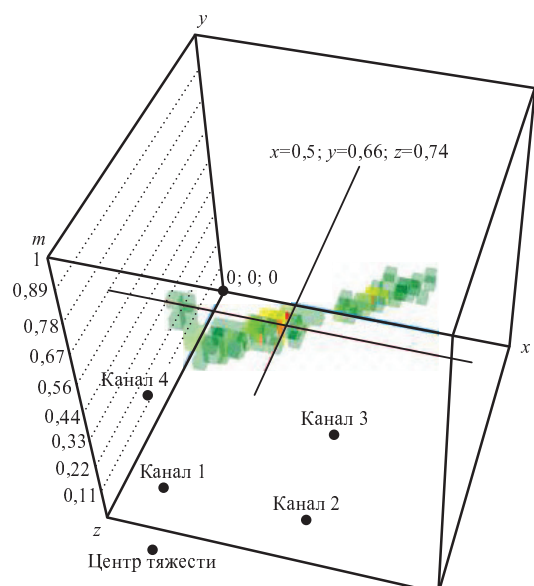


Рис. 5. Вероятные координаты источника дефекта до (а) и после (б) устранения неисправности

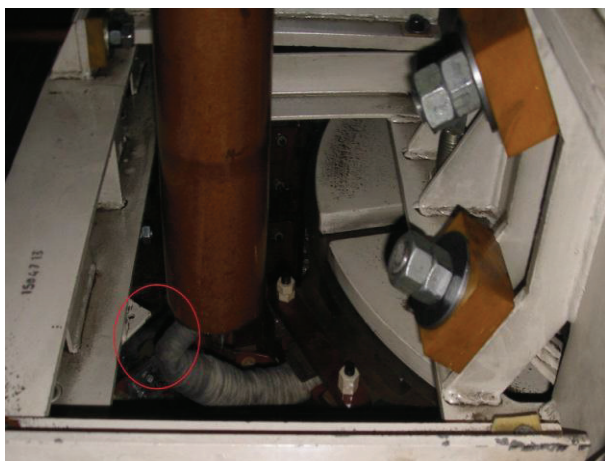


Рис. 6. Диагностированный «источник» повышенной разрядной активности

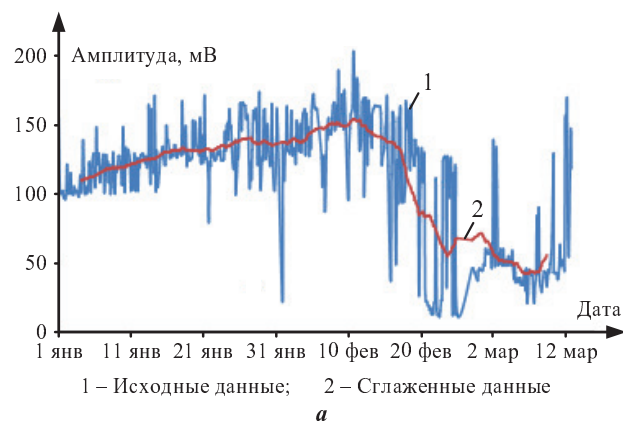


Рис. 7. Экспериментальные тренды амплитуды (а) и мощности (б) ЧР за период с 1.01.17 по 12.03.17

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили эффективность разработанного способа контроля состояния и локализации неисправностей, включающего on-line мониторинг и периодическую акустическую локацию разрядной активности. При этом средствами on-line мониторинга оценивается общее состояние объекта и диагностируется возникновение неисправности. Проведение замеров переносным прибором и обработка сигналов с заданной периодичностью позволяют определить скорость развития дефекта и по смещению кластеров выполнить его идентификацию.

Несмотря на то, что в приведенном примере обнаружено несколько вероятных координат источника дефекта, зона повышенной акустической активности в баке трансформатора локализована достаточно точно. Для идентификации неисправности целесообразно сопоставление найденной зоны с чертежами либо объемным изображением трансформатора. При проведении планового технического обслуживания необходимо более внимательно обследовать указанную зону. Для определения тенденции развития дефектов обязательно постоянное наблюдение за разрядными явлениями в период последующей эксплуатации.

Общим недостатком приборов акустической локации ЧР является низкая «глубина» акустического контроля и соответственно низкая эффективность применения на крупногабаритных трансформаторах. Кроме того, эффективный контроль технического состояния с помощью переносных приборов затруднен отсутствием доступных инженерных методик диагностирования

состояния по совокупности признаков. Решение этих проблем должно стать предметом дальнейших исследований и разработок в принятом направлении.

**Исследования выполнялись в рамках гранта МД-979.2017.8.**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карандаева О.И. Характеристика повреждаемости сетевых и блочных трансформаторов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2011. №4. С. 15-20.
2. Система диагностического мониторинга технического состояния трансформатора дуговой сталеплавильной печи / Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Храмшин В.Р., Сарлыбаев А.А. // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 4. С. 27-33.
3. Система оперативного контроля технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Храмшин В.Р., Сарлыбаев А.А. // Металлург. 2014. №10. С. 42-47.
4. Karandaev, A.S. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring / A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khramshin, O.I. Karandaeva // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk. 2014. Vol. 1. P. 273-279. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040896
5. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Sarlybaev A.A. System for Real-Time Monitoring of the Technical State of a Transformer on an Ultrahigh-Power Electric-Arc Steelmaking Furnace. Metallurgist. Vol. 58. №9-10. 2014. P. 872-879. DOI: 10.1007/s11015-015-0010-z
6. Диагностические функции системы непрерывного контроля технического состояния трансформаторов агрегатов дуговых сталеплавильных печей / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмшин, Р.А. Леднов // Металлург. 2014. №8. С. 53-59.
7. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, Р.А. Леднов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 58-68.
8. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. Екатеринбург: УрГУПС, 2011. 367 с.
9. Sikorski W., Walczak K. Power Transformer Diagnostics Based on Acoustic Emission Method. <http://dx.doi.org/10.5772/55211>
10. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Karandaeva O.I. Application of subtractive clustering for power transformer fault diagnostics. Procedia Engineering, 129, 2015, pp. 22-28. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.003
11. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, О.И. Карандаева, С.Е. Мостовой, А.А. Чертоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». Вып. 10. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. № 26(126). С. 26-31.
12. Пат. 2615790 РФ, МПК H02N 7/04. Устройство для мониторинга силовых трансформаторов / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, А.А. Николаев. Опубл. 11.04.2017. Бюл. №11.

Поступила в редакцию 09 января 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

TRANSFORMER FAULT LOCATION BY MEANS OF PARTIAL DISCHARGES ACOUSTIC RADAR

Andrey A. Nikolaev

Supervisor of high voltage overhead network section, Power supply department, PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia. E-mail: [nikolaev.ana@mmk.ru](mailto:nikolaev.ana@mmk.ru)

Ekaterina A. Khramshina

Research officer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Artemii A. Nikolaev

Postgraduate Student, Power Engineering and Automated Systems Institute, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Monitoring of the technical state and the location of failures are the urgent tasks providing failure-free operation of furnace transformers of metallurgical plants. Solution of these problems predetermines the urgency of introducing diagnostic systems and test instruments as well as development of ways and methods providing localization and identification of faults. It was shown that the most efficient solution of these problems is provided by mean of acoustic finding of partial discharges and further calculation of their integral characteristics. A new method of state control was developed, which includes on-line monitoring carried out by a stationary system and a periodic acoustic finding of partial discharges by a portable instrument. The research group considered a method of failure localization based on the defining of discharge coordinates in the transformer tank and their mathematical processing using the subtractive clustering method. The article offers an example of a certain failure localization of the ladle furnace transformer. It was confirmed that localization of the failure was quite valid. The authors offer their recommendations on maintenance of the transformer and further application of the obtained results.

**Keywords:** furnace transformer, technical state, monitoring, failure, localization, method, partial discharges, acoustic radar, practical application, validity, confirmation.

REFERENCES

1. Karandaeva O.I. Damage rate characteristic of network and main transformers of the OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works". *Vestnik Yuzno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South-Ural state university. Series: Power engineering]. 2011, no. 4, pp. 15-20. (In Russian)
2. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Sarlybaev A.A. System of diagnostic monitoring of the technical state of the arc steel-making furnace transformer. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, electrotekhnicheskaya promyshlennost* [Electro. Electrical engineering, power engineering, electrical engineering industry]. 2014, no. 4, pp. 27-33. (In Russian)
3. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Sarlybaev A.A. The system of on-line control of the tech-

- nical state of the transformer of an ultra-high power arc steel-making furnace. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 10, pp. 42-47. (In Russian)
4. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Karandaeva O.I. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring. 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 273-279. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040896.
  5. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Sarlybaev A.A. System for Real-Time Monitoring of the Technical State of a Transformer on an Ultrahigh-Power Electric-Arc Steelmaking Furnace. *Metallurgist*, vol. 58, no. 9-10, 2014, pp. 872-879. DOI: 10.1007/s11015-015-0010-z
  6. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khrumshin V.R., Lednov R.A. Diagnostic functions of on-line control of the technical state of transformers of arc steel-making furnaces. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, no. 8, pp. 53-59. (In Russian)
  7. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Lednov R.A. Requirements to the system of technical state monitoring of the transformer of an ultra-high power arc steel making furnace. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Machine-building: network electronic scientific journal], 2013, no. 2, pp. 58-68. (In Russian)
  8. Rusov V.A. *Izmerenie chastichnykh razryadov v izolyatsii vysokovoltного oborudovaniya* [Measuring of partial discharges in isolation of high-voltage equipment]. Yekaterinburg, UrGUPS, 2011. 367 p. (In Russian)
  9. Sikorski W., Walczak K. Power Transformer Diagnostics Based on Acoustic Emission Method. <http://dx.doi.org/10.5772/55211>
  10. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Karandaeva O.I. Application of subtractive clustering for power transformer fault diagnostics. *Procedia Engineering*, 129, 2015, pp. 22-28. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.003
  11. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Karandaeva O.I., Mostovoy S.E., Chernousov A.A. Control of the technical state of power transformers using the method of acoustic diagnostics. *Vestnik Yuzhnouralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South-Ural state university. Series "Power engineering"]. Issue 10. Chelyabinsk: Publishing center of YuUGU, 2008, no. 26(126), pp. 26-31. (In Russian)
  12. Khrumshin V.P., Karandaev A.S., Khrumshin R.R., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Nikolaev A.A. *Ustroystvo dlya monitoring silovykh transformatorov* [A device for power transformer monitoring]. Patent RF no. 2615790, 2017.

---

Николаев Ан.А., Храмшина Е.А., Николаев Ар.А. Локализация неисправностей трансформатора средствами акустической локации частичных разрядов // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 48-54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-48-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-48-54)

---

Nikolaev An.A., Khrumshina E.A., Nikolaev Ar.A. Transformer Fault Location by Means of Partial Discharges Acoustic Radar. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 48-54. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-48-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-48-54)

---