



ИНФОРМАТИВНОСТЬ ONLINE МОНИТОРИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ В СОПОСТАВЛЕНИИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

И. В. Ярошенко¹, В. В. Носенко¹, М. С. Алтунина¹, Ю. П. Аксенов²

¹Шахтинский автодорожный институт (филиал) Южно-Российского

государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, г. Шахты

²ООО «Высоковольтные измерительные комплексы и системы», г. Балаково

Принятые в практике диагностики турбогенераторов измерения частичных разрядов и спектрального анализа вибрации в разное время и часто разными людьми — малоинформативно. Намного выше информативность при одновременном измерении в одной точке и разрядов, и вибрации, что позволяет увидеть как синергию «виброявлений и разрядов», так и обратную синергию «разрядов и виброявлений». Анализ распределения магнитного поля по поверхности корпуса генератора позволяет выявлять результат «работы» разрядов и вибрации, определять их воздействие на шины и токоведущие элементы турбогенераторов. В работе даны практические примеры определения зон дефектов по указанному методу и подтверждение их при визуально-инструментальном осмотре во время ремонта.

Ключевые слова: диагностика, мониторинг, короткозамкнутый контур, амплитуда магнитного поля, виброявления, разряды, спектр гармоник.

Для цитирования: Ярошенко И. В., Носенко В. В., Алтунина М. С., Аксенов Ю. П. Информативность online мониторирования параметров технического состояния турбогенераторов в сопоставлении с результатами визуального контроля // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 72–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-72-81. EDN: HNXVOD.



© Ярошенко И. В., Носенко В. В., Алтунина М. С., Аксенов Ю. П., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFORMATIVE VALUE OF ONLINE MONITORING OF TURBO GENERATOR TECHNICAL CONDITION PARAMETERS COMPARED TO VISUAL INSPECTION

И. В. Ярошенко¹, В. В. Носенко¹, М. С. Алтунина¹, Ю. П. Аксенов²

¹Shakhty Automobile Institute (branch) South-Russian State Polytechnic University named after M. I. Platov, Shakhty, Russia

²LLC "High voltage measuring complexes and systems", Balakovo, Russia

Measurements of partial discharge amplitudes and spectral analysis of vibration at different times and often by different people are poorly informative, which are accepted in the practice of turbine generator diagnostics. The information content is much higher when both discharges and vibrations are measured at the same point, this allows you to see both the synergy of "vibration phenomena and discharges" and the reverse synergy of "discharges and vibration phenomena". And the analysis of the distribution of the magnetic field over the surface of the generator housing makes it possible to identify the result of the "operation" of the discharges and vibration. To determine their effect on tires and current-carrying elements of turbo generators the paper provides practical examples of determining defect zones using this method and confirming them during visual and instrumental inspection during repairs.

Keywords: диагностика, мониторинг, короткозамкнутый контур, магнитное поле, вибрации, разряды, спектр гармоник.



Актуальность

В практике эксплуатации турбогенераторов распространенным является раздельное измерение частичных разрядов (ЧР) в изоляции и вибрации в разных участках статорной обмотки [1–3]. Как показано в данной работе, более информативным является локация (измерение в одной зоне) одновременно нескольких параметров. Многолетний опыт авторов по анализу информативности параметров показывает, что измерения только «амплитудных» значений (кажущегося заряда ЧР, виброперемещений) малоинформативны. Применение новых методов диагностирования «тонких» параметров ВИБРО (энергия виброперемещения, определяемая по спектральному анализу после Фурье преобразования) и разрядных явлений [4, 5], а также характеристик магнитного поля в одной зоне позволяет получить более достоверную информацию, а также оценку корреляции явлений в данном дефекте. В работе будет показана:

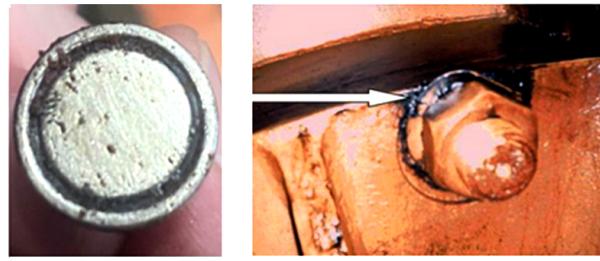
— высокая информативность комплексного online диагностирования при одновременном измерении в одной зоне вибрационного спектра (гармонического анализа), функции распределения амплитуд разрядов и их числа, а также спектра токов на поверхности щитов и корпуса, по которым определяется амплитуда осевой составляющей магнитного поля и признаки образования КЗ-контура;

— учет синергии явлений, например, воздействия «виброявлений — на разряды», но также и обратного воздействия «разрядов — на вибрацию», когда сначала появляются искровые процессы в магнитной системе генератора или элементах ее крепления (стяжных призмах, нажимных плитах, пакетах активной стали), затем образуется контур с токами в несколько килоампер, который, в свою очередь, начинает влиять на вибрацию;

— необходимость анализа распределений спектра магнитного поля на поверхности корпуса, так как его значительное изменение говорит об образовании КЗ-контура, а также ведет к появлению новых силовых воздействий на шины и токонесущие узлы турбогенераторов (ТГ), т.е. обратное влияние ЭРА (частичных разрядов ЧР, искрений, поверхностных, пазовых, разрядов в роторе) на ВИБРО, хотя в основе процесса была вибрация, которая привела к разрядам, образованию контура и усилению вибрации.

Следует подчеркнуть, что надежность проведенных измерений, локации зон и комплексного определения видов дефектов подтверждена данными визуального контроля во время ремонта (рис. 1б).

Целью работы является обоснование различных диагностических параметров, их взаимосвязи для последующего определения технического состояния и критериев его оценки по каждому параметру. Кроме того, данные работы показывают, что имеет место достоверное количественное определение и локализация дефекта. При этом определение технического состояния только по одному линейному



а) б)

Рис. 1. Последствия вибрации и образования КЗ-контуров с образованием повреждения сердечника:
а — мелкодисперсная пыль от истирания листов активной стали на испытуемом ТГ; б — подгары на гайках стяжной призмы и признаки ослабления крепления нажимной плиты (ТВВ-1000/2 ЮУАЭС)

Fig. 1. Consequences of vibration and the formation of short-circuit circuits with the formation of core damage:
a — fine dust from the abrasion of active steel sheets on the test TG; b — fire on the nuts of the clamping prism and signs of loosening of the pressure plate attachment (TVV-1000/2 of the South Ukrainian NPP)

параметру (амплитуде импульса ЧР и виброперемещению), тем более снятому в разное время [6, 7], может привести к ошибке в определении степени развитости (опасности) дефекта.

1. Средства и методы определения технического состояния ТГ

Параметры, определяющие техническое состояние

1) воздействующие факторы [8]:

— режим работы ТГ (активная мощность — P , реактивная мощность — Q);
— амплитуда A_{100} — амплитуда спектральной линии на частоте 100 Гц (частоте основного взаимодействия пондеромоторных сил в генераторе);

2) последствия от ВИБРО воздействий:

— виброудары — дискриминант $\delta = \sum P_{\text{ч.г.}} / P_{100\text{Гц}}$, о.е. — определяющий изменение спектрального состава за счет вклада от высших гармоник (200, 300 Гц и т.д.) — определяет виброударные воздействия на сердечник.

— деструкция (разрушение) — дискриминант $\bar{\Delta} = \bar{\Sigma}_{\text{и.г.}} - \bar{\Sigma}_{\text{ч.г.}}$, АБ — усредненная мера деструктивного воздействия определяется энергией интергармоник, которые возникают в дефекте из-за микрополомок в вибрирующем узле;

3) электроразрядные явления [9]:

— амплитуда импульса разряда — $Q_{\text{ЭРА}}$, мВ;
— мощность ЭРА — $P_{\text{ЭРА}}$, о.е.;
— число импульсов с данной амплитудой n , импульсов за период промышленной частоты 50 Гц. Для построения зависимости n ($Q_{\text{ЭРА}}$);

4) магнитное поле (признак формирования КЗ-контура):

— амплитуда магнитного поля по первой гармонике — $A_{50\text{Гц}}$;

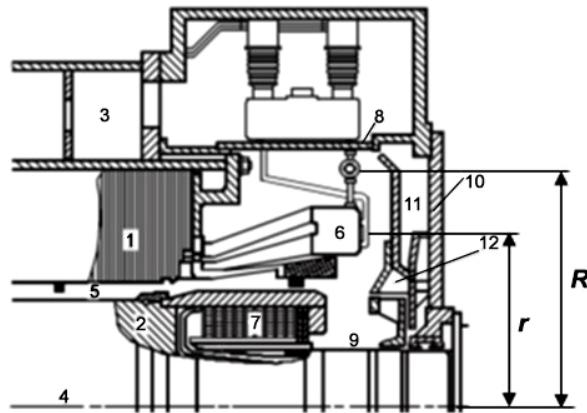


Рис. 2. Узлы активной части в торцевой зоне, в которых вероятно появление дефектов.
Конструкция торцевой зоны турбогенератора ТВВ-500-2ЕУЗ:

1 — сердечник статора; 2 — сердечник ротора; 3 — вентиляционные каналы; 4 — ось вращения ротора; 5 — воздушный зазор; 6 — лобовая часть обмотки статора; 7 — лобовая часть обмотки ротора; 8 — кожух; 9 — вал; 10 — торцевой щит; 11 — выступы газового канала; 12 — вентиляционный узел

Fig. 2. Nodes of the active part in the end zone where defects are likely to occur. The design of the end zone of the TVV-500-2EUZ turbogenerator:

1 — stator core; 2 — rotor core; 3 — ventilation ducts; 4 — axis of rotation of the rotor; 5 — air gap; 6 — frontal part of the stator winding; 7 — frontal part of the rotor winding; 8 — casing; 9 — shaft; 10 — end shield; 11 — projections of the gas duct; 12 — ventilation unit

— признак КЗ-контура $\mu = \frac{\Sigma A_{\text{нечет. гарм.}}}{A_{50}}$ (при отсутствии КЗ-контура $\mu < 1,2$; критический контур при $\mu > 5$).

Конструкция (поперечное сечение) турбогенератора со стороны «В» показана на рис. 2 для следующих зон:

- по большому радиусу R — контроль вибрации нажимной плиты, шин и головок стержней, ЧР в изоляции;
- по малому радиусу r — выход стержней из пазов, зубцы — искрения;
- по корпусу — для определения технического состояния сердечника.

Измерения проводились по большому числу точек (60–80) размещения датчика на щитах напротив шин и по корпусу. В каждой точке измерений фиксировались признаки ЭРА [10], а также спектр при измерении вибродатчиком, по которому определялись амплитуды спектральных линий, включая:

- 1-ю гармонику, которая определяет величину магнитного поля, а по 2-й гармонике фиксируются амплитуды виброперемещений;
- из набора четных гармоник, а также интергармоник рассчитываются диагностические параметры (δ — виброударные воздействия и Δ — деструкция).

Средства проведения диагностирования

Техническое состояние определялось при использовании «Системы непрерывного мониторинга — СМиД-1Г» и переносным комплексом «ДКЧР-2М», которые позволяют контролировать в ручном или автоматическом режиме параметры ЭРА и ВИБРО. СМиД включает в себя шесть комбинированных

датчиков ЭРА и ВИБРО со своей микропроцессорной системой обработки данных и передачи их на серверный шкаф в цифровом виде, где происходит дальнейшая обработка данных по формулам, приведенным выше (для ВИБРО — это результаты Фурье преобразования виброскорости, для ЭРА — это зависимости n ($Q_{\text{ЭРА}}$)). ДКЧР-2М включает в себя набор датчиков для фиксации и локации ЭРА и ВИБРО на различных частотах (для ЭРА от 100 кГц до 100 МГц, для ВИБРО от 0,8 Гц до 10 кГц, с записью в цифровой высокочастотный осциллограф и обработкой данных в компьютере после измерений). Датчики на магнитной основе устанавливаются в корпус генератора.

1. Преимуществом «СМиД» является возможность длительного анализа (трендов) при одновременном контроле ВИБРО, ЭРА параметров и магнитного поля при дневном и ночном изменении активной и реактивной нагрузки. Это позволяет определить особенности дефекта. Недостаток — ограниченное число датчиков. Так как изменение технического состояния в зоне происходит за время — месяцы, то «СМиД» не позволяет определить вне зоны чувствительности датчика вновь возникший дефект.

2. Преимуществом «ДКЧР-2М» является возможность локации зон дефектов по ~80–90 точкам и комплексной оценке технического состояния лобовых и пазовых частей. Недостаток: эти измерения проводятся в течение короткого времени (часы) и не определяют динамику изменений параметров дефектов по разовым измерениям через несколько месяцев.

3. Оптимальным для обеспечения полной информативности датчика может быть сочетание «Системы мониторинга» и периодического (один раз в полгода) использования переносного диагностического комплекса [11, 12].

Особенности явлений и их синергия

Данные для анализа нами получены в разные годы при измерениях на генераторах ТВВ-500-2 Курской АЭС ТГ-5 и ТГ-8, Ленинградской АЭС Г-7, Смоленской АЭС Г-4, ТВВ-1000-2 ТГ-3 Калининской АЭС, ТВВ-100-4 Балаковской АЭС ТГ-1 и ТГ-3, ТВВ-800-2 НВГРЭС ТГ-1. Ниже приводятся подходы к проведению измерений и анализу явлений в дефектах. Это показано на рис. 2.

Сценарий появления и развития дефекта в статоре. Старт развития дефекта обусловлен возникновением механических явлений, определяемых виброперемещениями — A_{100} и виброударами — δ , [13] под действием последних возникают деструктивные процессы — Δ , что, в свою очередь, приводит к возникновению электроразрядных (искровых) явлений. По факту образования контактов между металлическими частями возникают КЗ-контуры, изменяющие картину магнитных полей:

1) вибрационные явления. Анализ проводился по контролю спектра с оценкой амплитуды спектральной линии 100 Гц ($A_{100\text{Гц}}$). При этом получено:

— доминирование линии 100 Гц (при минимальных значениях других четных гармоник 200, 300... Гц), а также отсутствие интергармоник означает свободные колебания узла без механических потерь и диссипации;

— четные высокие гармоники (200, 400 Гц и т.д.) означают появление неупругих виброударов, приводящих к механическим повреждениям;

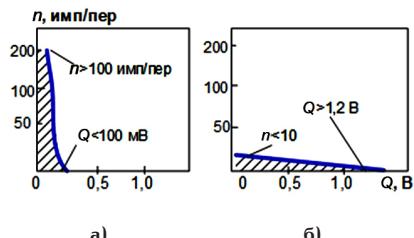


Рис. 3. Распознавание формы разряда по виду кривой n ($Q_{\text{ЭРА}}$):

а — вид $n(Q)$ для формы, соответствующей искрению, где Q — мин, величина n — макс;
б — вид $n(Q)$ для ЧР (величины Q — макс, n — мин)

Fig. 3. Description of the formulas of the rank according to the type of crooked arm n ($Q_{\text{ЭРА}}$):

а — type of $n(Q)$ — min, the corresponding search, somewhere Q — min, somewhere n — max; б — type of $n(Q)$ for the partial discharge (the value of Q — max, n — min)

— наличие интергармоник (для $\Delta > 5$ дБ) указывает на появление необратимых деструкционных (разрушающих) явлений в зоне вибрации.

Процесс деградации сердечника начинается со снижения среднего давления прессовки и появления местных ослаблений прессовки [14]. Это приводит к усталостным явлениям, истирианию листов и выходу дегтеобразных продуктов. При возникновении фреттинг-коррозии появляется вибрация листов активной стали в торце.

Скользжение листов способствует истирианию изоляционных лаковых покрытий и фреттинг-коррозии листов, это сопровождается искрениями. От истириания возникает «стальная пыль» (рис. 1а);

2) разрядные явления в изоляции конструкций. В межлистовой изоляции вибрации приводят к образованию неустойчивых гальванических контактов, в которых формируются искровые разряды [15]. В изоляции металлоконструкции из-за сильных механических воздействий возможно механическое повреждение изоляционных прокладок, это вызывает интенсивные искровые явления (пример на рис. 1б).

На рис. 3 показано, как по распределению n ($Q_{\text{ЭРА}}$) определяется форма разрядных явлений (ЧР и искрения) [9, с. 30–44], а также максимальная амплитуда импульсов $Q_{\text{ЭРА}}$ и число импульсов — n .

Повреждение изоляции происходит в несколько стадий:

— вначале механические отклонения из-за вибрации (A_{100} от разрушения креплений, что определяется деструкцией — Δ);

— далее возникают разряды, фиксируемые по распределениям n ($Q_{\text{ЭРА}}$);

3) явления в зоне КЗ-контура. Образование КЗ-контура происходит из-за механических воздействий, показанных на рис. 1:

— в узле «ласточкин хвост» в сердечнике;

— в металлоконструкциях креплений и прессовки торцевой зоны В.

Происходят виброудары (параметр — δ), это приводит к увеличению значения — μ . Под действием виброударов и механических повреждений возникают гальванические контакты (рис. 1б), выделяется пыль (рис. 1а), происходит спекание, которые и образуют КЗ-контуры. Вероятной причиной формирования КЗ-контуров является то, что



Рис. 4. Выход дегтеобразной массы в зоне вибрации и разрядов

Fig. 4. Tar-like mass output in the vibration and discharge zone

на участках креплений прессовки сердечника появляются замыкания деталей, из-за чего и возникают контуры. В контуре из-за влияния магнитного поля индуцируются токи.

2. Результаты диагностирования генератора

ТВВ-800/2 НВГРЭС с использованием «Системы непрерывного мониторинга СМиД-1Г» и локации зон дефектов переносным комплексом «ДКЧР-2М»

Особенностью является взаимное влияние вибрационных и электроразрядных явлений, определяющее появление КЗ-контуров, которые, в свою очередь, формируют сильные магнитные поля. Поскольку имеет место синергия, необходимо определить зависимости параметров на щите «В» «по часам» — 12 точек установки датчиков. Поскольку проводился инструментально-визуальный контроль, на разобранном генераторе имелась возможность сопоставить данные локации диагностических параметров (A_{100} , δ , Δ , $P_{\text{ЧР}}$ и μ) с визуальным представлением зоны со следами дефекта [16, 17].

Техническое состояние расточки и сердечника статора

Процесс развития ВИБРО явления. Начальными явлениями будут виброудары — δ , о.е., которые приводят к деструкции Δ (повреждения узлов крепления и прессовки пакетов, стяжных призм и стержней). Виброудары и деструкция приводят к нарушению межлистовой изоляции. Последнее определяет разряды в форме искрений. При выходе в ремонт и вскрытии генератора был произведен визуально-инструментальный контроль [18, 19]:

1) по пакетам локализованы значительные вибрационные процессы с наличием виброударов и деструкции узлов (предположительно в «ласточкинх хвостах» на стяжных призмах) и на металлоконструкциях креплений и прессовки со стороны «В» и «Г», обнаружена артритная пыль от изоляции и металлическая стружка;

2) в пакетах сердечника деструкция происходит с появлением искровых разрядов. На генераторе они локализованы в двух поясах со стороны «В». Виброудары и деструкция обуславливают истириание пластин стали в пакетах, последнее приводит к появлению мелкодисперсной стальной пыли (рис. 1). Пыль обнаружена и на лобовых частях;

3) обнаружен участок расточки, в котором есть признаки воздействий ВИБРО явлений, что обусловило выход черной дегтеобразной массы (рис. 4).

Смесь продуктов износа лака и полупроводящей пыли с маслом вследствие нагрева превращается в темную дегтеобразную массу с дисперсным железом. Вибрация листов сопровождается разрядными явлениями в форме искрений. Интенсивные искрения являются следствием деструкции узлов [20].

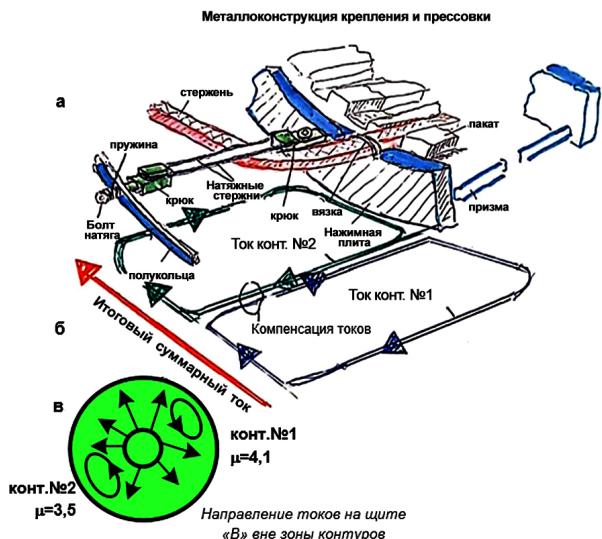


Рис. 5. Растекание тока на щите «В» по измерениям магнитного поля и признаков КЗ-контура — μ при измерениях «ДКЧР» 30.01.24 перед демонтажом «СМиД-1Г»: а — условные обозначения конструкции прессовки; б — схематичное изображение протекания токов по элементам конструкции при образовании КЗ-контуров; в — результат измерений 30.01.24 перед демонтажом «СМиД-1Г»

Fig. 5. Current spreading on the shield "B" according to measurements of the magnetic field and signs of the short circuit during measurements of "HDR" on 30.01.24 before dismantling "Continuous Monitoring Systems-1G":
а — symbols of the pressing design;
б — schematic representation of the flow of currents through the structural elements during the formation of short-circuit circuits; в — measurement result on 30.01.24 before dismantling
"Continuous Monitoring Systems-1G"

Техническое состояние торцевой зоны на стороне «В»

Наибольшая мощность ЭРА составляет $\sim 5-9$ о.е. (норма менее 1,0). Кроме этого фиксируется экстремально большое число импульсов $n \sim 450$ имп/пер (норма $n \sim 200$ имп/пер).

3. Причины появления КЗ-контуров в торцевой зоне и возникновения аномально сильных магнитных потоков на щите «В»

Конструкция торцевой зоны

Конструкция прессовки сердечника заключается в использовании металлических конструкций (стяжных призм, нажимных плит) путем поджатия пакетов к нажимным плитам. Учитывая возможность повреждения изоляционных прокладок между элементами конструкции, возникает возможность замыкания и образования протекания токов в замкнутых узлах с возникновением сильных токов от магнитного потока в торцевой зоне. По данным [13, с. 3] величина токов в КЗ-контуре $\sim 10-15$ кА. Пример — рис. 5, где показано наличие в лобовой части значительного КЗ-контура (для $\mu \sim 10$) на щите «В», на 5 час. В остальных зонах — штатное протекание тока:

- на корпусе — осевое;
- на щите — радиальное.

На рис. 5 условно показано протекание токов по двум соседним контурам и видно, что имеет место компенсация радиальных токов в зонах без дефектов.

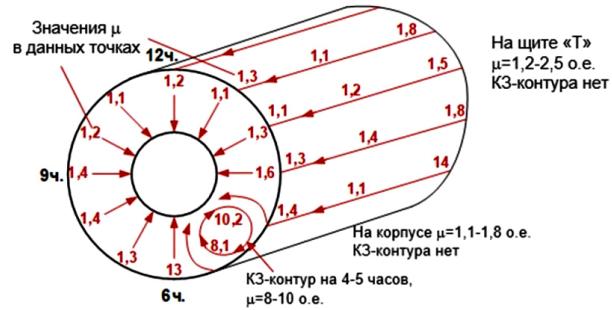


Рис. 6. Результат локации наличия КЗ-контуров, определяемых по значениям нечетных гармоник магнитного поля (картины растекания токов) из данных ППО (2020 г.), определяемого по дискриминанту μ , значения которого по точкам контроля на щитах и корпусе

Fig. 6. The result of locating the presence of short-circuit circuits, determined by the values of the odd harmonics of the magnetic field (current spreading pattern) from the data of the TPO (2020), determined by the discriminant μ , the values of which are based on the control points on the shields and the housing

Результаты определения КЗ-контуров

После ремонта фиксировался контур, показанный на рис. 6. В зоне КЗ-контуров возникает итоговый суммарный ток от нескольких цепей. Это обстоятельство и является причиной появления токов, протекающих по окружности. На других участках на щите направление тока по радиусу.

4. Возможные причины («гильотинных») повреждений шин статора

Для турбогенератора ТВВ-800-2 характерны дефекты, имеющие место в шинах на стороне «В», приводящие к повреждению. Это фиксировалось за время эксплуатации (~ 10 повреждений).

Вибрационное состояние шин ухудшается из-за следующих причин [21, 22]:

— возникновения резонансов в ее узлах с собственными частотами, близкими к частотам электромагнитных сил (100 Гц), это также приводит к росту повреждений участков шин;

— значительных виброперемещений шин под действием электромагнитных (пондеромоторных) сил — рост A_{100} .

Возрастание вибрации приводит к значимым повреждениям в узлах конструкции. Анализ повреждений показывает, что возможны следующие варианты повреждений (рис. 7):

первый вариант — повреждения изоляции шин в шинодержателях (а) ТВФ-110-2;

второй вариант — разрушение цепей части шины токонесущего узла (б) ТВВ-800-2;

третий вариант — повреждения гибких связей (в) ТВВ-1000-2.

Описание механизма повреждения шин:

1) развитие повреждений шин от вибрации (гильотинное повреждение).

Учитывая наличие в торцевой зоне сильных магнитных полей «В» на участке шин, расположенных между конструктивными опорами, по которым протекает рабочий ток I , действует сила $F \sim I \cdot \vec{B}$. Поскольку ток по всем шинам одинаков, локальное увеличение действующей силы возможно за счет локального возрастания магнитного поля \vec{B} . Увеличение \vec{B} возможно за счет образования КЗ-контура.



Рис. 7. Варианты дефектов шин:
а — первый вариант — повреждение изоляции шин в креплении шинодержателя с истиранием изоляции (до меди); б — второй вариант — механическое разрушение выводной шины к линейному трансформатору ф. В, ТВВ-800. Диагностический признак — критический рост виброперемещений на частоте 100 Гц, разрядные процессы отсутствовали; в — третий вариант — повреждение гибкой перемычки 1С1 из-за растрескивания металла и металлического разрушения металла от вибрации и возникновения дуги в зонах разрыва

Fig. 7. Variants of tire defects:
a — the first option is damage to the tire insulation in the tire holder attachment with insulation abrasion (up to copper); б — the second option is mechanical destruction of the output busbar to the linear transformer ф. В, ТВВ-800. The diagnostic sign is a critical increase in vibration displacements at a frequency of 100 Hz, there were no discharge processes; в — the third option is damage to the 1С1 flexible bridge due to metal cracking and metal destruction from vibration and arcing in the rupture zones

Последовательность развития явлений в шинодержателе из-за увеличения вибрации шины:

— перемещения шины в креплениях шинодержателя из-за фрикционных явлений приводят к разрушению изоляции (а);

— появление участков с оголением меди может привести к перекрытию при коммутационных перенапряжениях или при испытаниях;

2) анализ образования трещины вшине фазы (ф.) В при значительных виброперемещениях (параметр A_{100}).

Вибродиагностика шин (за семь месяцев до вне-планового ремонта) показала:

— фиксацию экстремальных виброперемещений на 6 час.,

— нулевые диагностические параметры (δ и Δ).

В момент диагностирования имеет место отсутствие неупругих виброударов и деструктивных, разрушающих последствий.

Изоляция шин и элементарных пластин сердечника на момент измерений была в норме и разрядных явлений не фиксировалось.

Варианты виброконтроля отводных шин

Повреждения шин на отводах контролировались системами:

а) первый вариант — постоянный мониторинг Система «СМ-Электросила» с размещением вибродатчиков на шинах внутри корпуса [22, с. 7].

Датчики рис. 8 установлены выше наконечника выводов и размещены на каждой из сдвоенных шин (всего 4 шт.) При наличии одинаковых значений на шинах ф. А и С считается, что источником сигнала является шина ф. В.

Датчики — оптические акселерометры измерения виброускорения FOA-100E фиксировали виброперемещения (мкм). Указанными датчиками зафиксированы признаки повышенной вибрации на ф. В, на этом основании бригадой «СМ» проведен ремонт с заменой шин;

б) второй вариант — вибродиагностирование выполнялось переносной «Системой СМиД-1Г» с размещением вибродатчиков на внешней поверх-

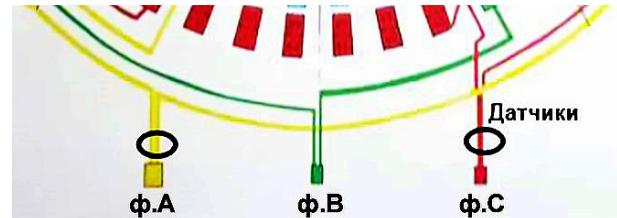


Рис. 8. Расположение датчиков мониторинга «СМ-Электросила» на шинах

Fig. 8. The location of the "SM-Electrosila" monitoring sensors on the tires

ности щита «В» над вводами. Анализ по вибрации по варианту шин проводился на базе контроля спектра с оценкой амплитуды спектральной линии 100 Гц ($A_{100\text{Гц}}$); было выявлено, что имеет место доминирование линии 100 Гц. Это означает, что присутствуют только свободные колебания узла без механических потерь и диссипации.

Вибродиагностирование шин

1. Результат измерений.

Датчики устанавливались на щите. Измерения проведены в трех точках над ф. А, ф. В и ф. С, т.е. на 5, 6 и 7 час. При первых измерениях ППО (предпроектное обследование) имелась возможность контролировать вибрацию при различной выдаче реактивной мощности (от -20 до $+100$ МВАр). На рис. 9 показано изменение амплитудных линий 100 Гц в зависимости от Q . Максимальная вибрация фиксировалась при max выдаче $Q = 100$ МВАр. По этой причине далее сопоставления (разных точек) проводились при близких значениях Q .

Особенности изменений амплитуд 100 Гц показаны на рис. 10 при проведении локации в точках (по часам) на щите «В». Для $A_{100\text{Гц}}$ кривая 1 (данные 2021 г.) показывает, что max $A_{100\text{Гц}}$ в точке на 6 час., т.е. над ф. В.

Амплитуда виброперемещений за время периодического «ручного» диагностирования с 2020 до 2024 гг. показана на рис. 11 для шин вводов «В»

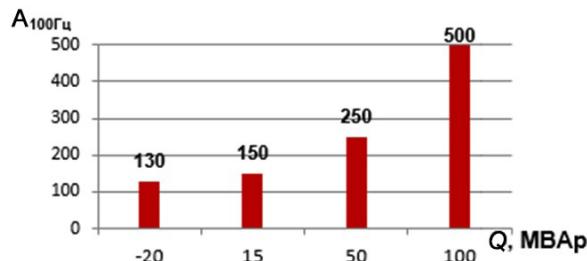


Рис. 9. Изменения виброскорости в зависимости от реактивной мощности
Fig. 9. Vibration velocity changes depending on reactive power

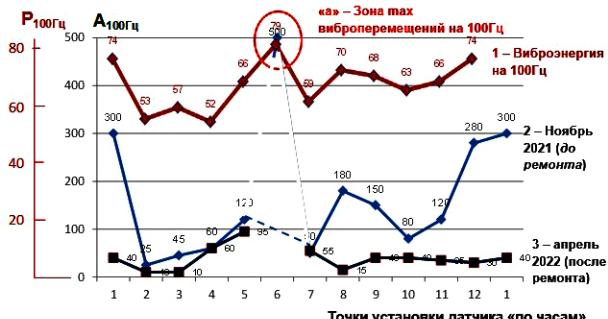


Рис. 10. Изменения амплитуды спектральной линии 100 Гц (виброперемещения) по точкам контроля (по часам) для измерений в ноябре 2021 г. ($Q = 100$ МВАр) — кривая 2, в апреле 2022 г. ($Q = 89$ МВАр) — кривая 3,

а также виброзергии на $P_{100\text{Hz}}$ [8, с. 11, 26] — кривая 1
Fig. 10. Changes in the amplitude of the 100 Hz spectral line (vibration displacement) at the control points (by the clock) for measurements in November 2021 ($Q = 100$ MVar) — curve 2 in April 2022 ($Q = 89$ MVar) — curve 3, as well as vibration energy at $P_{100\text{Hz}}$ [8, p. 11, 26] — curve 1

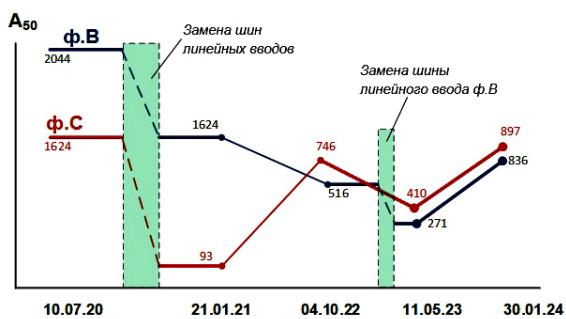


Рис. 11. Динамика изменений амплитуд спектральных линий A_{50} для ф. В (ремонт всех фаз) и ф. С (ремонт одной фазы)
Fig. 11. Dynamics of changes in the amplitudes of spectral lines A_{50} for ф. В (repair of all phases) and ф. С (repair of one phase)

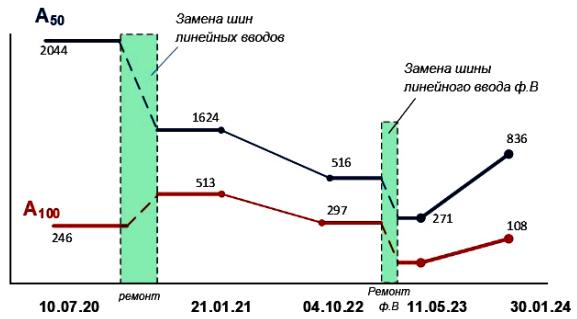


Рис. 12. Сопоставление динамики изменений амплитуд спектральных линий A_{50} — величины магнитного поля, A_{100} — значения виброперемещений
Fig. 12. Comparison of the dynamics of changes in the amplitudes of spectral lines A_{50} — magnitudes of the magnetic field, A_{100} — values of vibration displacements

и «С». Из рис. 11 видно уменьшение A_{100} после ремонта. На рис. 10 и 11 прослеживается история ремонта:

- замена всех шин после ППО. Это видно на рис. 11 по броскам величин A_{100} на ф. В и ф. С;
 - ремонт с заменой только шины ф. В. Это видно на рис. 11 из сопоставления ф. В и ф. С в 2022 г.
2. Влияние изменений магнитного поля на тренды параметров.

Влияние тренда сильного магнитного поля на щите следует из сопоставления (кривые $A_{50}(t)$ и $A_{100}(t)$) на рис. 11. Есть корреляция этих параметров, что показывает решающее влияние на тренд виброперемещения — $A_{100}(t)$, воздействия от магнитного поля — $A_{50}(t)$.

Механизм возможного повреждения шин

Из рис. 12 — распределение магнитного поля на щите «В» видно, что в области вводов имеет место сильное магнитное поле (A_{50}). В этой зоне при аксиальном направлении магнитного поля для шин с радиальным направлением рабочего тока имеется сильное воздействие [23]. Таким образом, в магнитном поле имеются сильные силовые воздействия на участки шины. Это приводит к возникновению усталостных напряжений и механических повреждений.

Заключение

Особенности технического состояния генератора определяются по данным локации «Системой

непрерывного мониторинга (СМиД-1Г)» и периодически переносной «Системой диагностирования (ДКЧР-2)».

Важно, что в обоих случаях имеется возможность одновременного в одной зоне проведения измерения параметров ЭРА и ВИБРО. Что дает возможность проводить углубленный анализ и представление явлений по сопоставлению данных по электроразрядной активности (искрениям) в зависимости от вибрационных воздействий (деструкции и вибруударов). А также позволяет выявить признаки КЗ-контура) по наличию сильного магнитного поля в локальной зоне.

1. Опыт длительного анализа результатов диагностирования большого парка турбогенераторов показывает, что типичный (наиболее вероятный) сценарий развития повреждений состоит из следующих стадий:

- старт — механические явления (виброперемещения, вибруудары и т.д.);
- развитие механического явления — разрушение креплений (деструкция);
- появление искрений в повреждениях контактов или изоляции;
- появление ЧР в местах истирания изоляции при повышенной вибрации обмотки.

Анализ всей совокупности параметров явлений в дефекте позволяет получить комплексную оценку технического состояния узла статора в данной зоне.

Сопоставление данных локации по всем параметрам позволяет определить зоны критических де-

фектов, сопоставление видов параметров позволяет уточнить риск повреждения в ближайшее время. Указанные измерения, проводимые периодически, позволяют определить тренды, т.е. выполнить прогнозирование. Последнее дает возможность оценить по сценарию развития повреждения в каком временном участке развития находится дефект в данном узле. Следует указать, что анализ только одного явления не позволяет надежно определить расход ресурса, т.е. выполнять прогнозирование.

Важным является сопоставление критических параметров с данными визуального контроля.

Таким образом, результаты комплексного анализа подтверждаются данными визуального контроля.

Список источников / References

1. Аксенов Ю. П., Аксенов Д. П., Талапов С. Б. [и др.]. Применение диагностики для определения объема ремонта турбогенераторов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. № 2. С. 27 – 36. EDN: KUZHTD.

Aksenov Yu. P., Aksenov D. P., Talapov S. B. [et al.]. Primenenie diagnostiki dlya opredeleniya ob'ema remonta turbogeneratorov [Diagnostics application for determining the repair rate of turbogenerators]. Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'. ELEKTRO. Electrical engineering. Electric power industry. Electrical engineering industry. 2009. No. 2. P. 27 – 36. EDN: KUZHTD. (In Russ.).

2. Аксенов Ю. П., Ярошенко И. В. Комплексная диагностика турбогенераторов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2006. № 2. С. 21 – 24. EDN: KVHYST.

Aksenov Yu. P., Yaroshenko I. V. Kompleksnaya diagnostika turbogeneratorov [Comprehensive diagnostics of turbogenerators]. Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'. ELEKTRO. Electrical engineering. Electric power industry. Electrical engineering industry. 2006. No. 2. P. 21 – 24. EDN: KVHYST. (In Russ.).

3. Розум Т. И., Полищук В. И. Разработка архитектуры интеллектуальной системы функциональной диагностики турбогенератора // Вестник науки Сибири. 2015. № S1 (15). С. 83 – 86. EDN: UBTJTB.

Rozum T. I., Polishchuk V. I. Razrabotka arkhitektury intellektual'noy sistemy funktsional'noy diagnostiki turbogeneratora [Development of architecture of intellectual system of the turbogenerator functional diagnostics] // Vestnik nauki Sibiri. The Siberian Science Bulletin. 2015. No. S1 (15). P. 83 – 86. EDN: UBTJTB. (In Russ.).

4. Махутов Н. А., Назолин А. Л. Диагностика состояний и обоснование безопасности турбогенераторов критически и стратегически важных энергоустановок // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2016. № 2. С. 3 – 24. EDN: WFNCVL.

Makhutov N. A., Nazolin A. L. Diagnostika sostoyaniy i obosnovanie bezopasnosti turbogeneratorov kriticheski i strategicheski vazhnykh energoustanovok [Diagnostic of states and justification of safety of turbogenerators critically and strategically important power stations]. Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy. Safety and emergencies problems. 2016. No. 2. P. 3 – 24. EDN: WFNCVL. (In Russ.).

5. Филина О. А., Гиматдинов Ф. С., Елисеев Б. О. Некоторые аспекты технологии проведения предремонтной и послеремонтной диагностики турбогенераторов // Наука сегодня: история и современность: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Вологда: ООО «Маркер», 2017. Т. 1. С. 87 – 89. EDN: ZUXDYT.

Filina O. A., Gimatdinov F. S., Eliseev B. O. Nekotorye aspekty tekhnologii provedeniya predremontnoy i poslremontnoy diagnostiki turbogeneratorov [Some aspects of the technology

of pre-repair and post-repair diagnostics of turbogenerators] // Nauka Segodnya: Istorya i Sovremenost'. Vologda, 2017. Vol. 1. P. 87 – 89. EDN: ZUXDYT. (In Russ.).

6. Гончар Д. В., Якименко А. А. Диагностика состояния изоляции турбогенераторов измерением частичных разрядов // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: тр. XVII Междунар. конф. Крым, 2018. С. 8 – 10. EDN: YRHGRV.

Gonchar D. V., Yakimenko A. A. Diagnostika sostoyaniya izolyatsii turbogeneratorov izmereniem chastichnykh razryadov [Diagnostics of the insulation condition of turbogenerators by measuring partial discharges]. Elektromekhanika, Elektrotehnologii, Elektrotehnicheskie Materialy i Komponenty. Crimea, 2018. P. 8 – 10. EDN: YRHGRV. (In Russ.).

7. Ба Бораик А. М., Усачев А. Е., Ильдарханов Р. Г. [и др.]. Новая методика определения размеров и положения дефектов в изоляции обмоток статоров турбогенераторов при измерениях в них частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 41 – 53. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-41-53. EDN: XWBLNB.

Ba Boraik A. M., Usachev A. E., Il'darkhanov R. G. [et al.]. Novaya metodika opredeleniya razmerov i polozheniya defektov v izolyatsii obmotok statorov turbogeneratorov pri izmereniyakh v nich chastichnykh razryadov [New method of determining size and provision of defects in the insulation of windings of stator of turbogenerators at measurement of partial discharges in them]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Power Engineering Research. Equipment. Technology. 2018. Vol. 20, no. 1-2. P. 41 – 53. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-41-53. EDN: XWBLNB. (In Russ.).

8. МР 1.2.1.13.0975 – 2014. Вибрационный контроль активной части турбогенераторов и электродвигателей. Введ. 01 – 09 – 2015. URL: <https://eshop.rosenergoatom.ru/> (дата обращения: 27.04.2025).

MR 1.2.1.13.0975 – 2014. Vibratsionnyy kontrol' aktivnoy chasti turbogeneratorov i elektrodvigateley [Vibration control of the active part of turbogenerators and electric motors]. URL: <https://eshop.rosenergoatom.ru/> (accessed: 27.04.2025). (In Russ.).

9. МУ 1.3.3.99.0036 – 2009. Диагностика изоляции вращающихся машин классов напряжения от 0,4 кВ до 24 кВ по характеристикам частичных разрядов. Введ. 01 – 12 – 2009. URL: <https://normativ.su/catalog/standart/1001/252725/> (дата обращения: 28.04.2025).

MU 1.3.3.99.0036 – 2009. Diagnostika izolyatsii vrashchayushchikhsya mashin klassov napryazheniya ot 0,4 kV do 24 kV po kharakteristikam chastichnykh razryadov [Diagnostics of the rotating machines insulation of voltage classes from 0.4 kV to 24 kV according to features of partial discharges]. URL: <https://normativ.su/catalog/standart/1001/252725/> (accessed: 28.04.2025). (In Russ.).

10. Круглова Т. Н., Ярошенко И. В., Рабаталов Н. Н. [и др.]. Интеллектуальный метод диагностирования турбогенератора на основе анализа разрядных явлений // Кибернетика энергетических систем: сб. материалов XXXIX сессии Всерос. научн. семинара по тематике «Электроснабжение». Новочеркасск, 2018. С. 185 – 192. EDN: KERMLW.

Kruglova T. N., Yaroshenko I. V., Rabatalov N. N. [et al.]. Intellektual'nyy metod diagnostirovaniya turbogeneratora na osnove analiza razryadnykh yavleniy [An intelligent method for diagnosing a turbogenerator based on the analysis of discharge phenomena]. Kibernetika Energeticheskikh System. Novocherkassk, 2018. P. 185 – 192. EDN: KERMLW. (In Russ.).

11. Орехов Э. А., Абрамов В. В. Методы неразрушающего контроля электротехнического оборудования // Энергоэксперт. 2020. № 2 (74). С. 16 – 19. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-97-109. EDN: KJOSYW.

Orekhov E. A., Abramov V. V. Metody nerazrushayushchego kontrolya elektrotehnicheskogo oborudovaniya [Remote monitoring and control of the status of transformers in distribution

electrical networks]. *Energoekspert*. 2020. No. 2 (74). P. 16–19. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-97-109. EDN: KJOSYW. (In Russ.).

12. Шевченко В. В. Прогнозирование эксплуатационного состояния турбогенераторов // Электрика. 2015. № 1. С. 3–7.

Shevchenko V. V. Prognozirovanie ekspluatatsionnogo sostoyaniya turbogeneratorov. [Forecasting the operational condition of turbogenerators]. *Elektrika*. 2015. No. 1. P. 3–7. (In Russ.).

13. Назолин А. Л. Обнаружение дефектов машин и механизмов циклического действия по временным и вибраакустическим параметрам: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2013. 32 с. EDN: ZOTMCH.

Nazolin A. L. Obnaruzhenie defektov mashin i mekhanizmov tsiklicheskogo deystviya po vremennym i vibroakusticheskim parametram avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Detection of defects in machines and mechanisms of cyclic action by temporal and vibroacoustic parameters]. Moscow, 2013. 32 p. EDN: ZOTMCH. (In Russ.).

14. Кузнецов Д. В. Развитие методов исследования процессов в узлах крепления сердечников статоров к корпусам турбогенераторов и совершенствование их диагностики в условиях эксплуатации: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 24 с. EDN: NKSZLH.

Kuznetsov D. V. Razvitiye metodov issledovaniya protsessov v uzlakh krepleniya serdechnikov statorov k korpusam turbogeneratorov i sovershenstvovanie ikh diagnostiki v usloviyakh ekspluatatsii. avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Development of methods for studying processes in the attachment points of stator cores to turbogenerator housings and improvement of their diagnostics under operating conditions]. Moscow, 2009. 24 p. EDN: NKSZLH. (In Russ.).

15. Назолин А. Л. Вибраакустическая диагностика и ресурсосберегающая эксплуатация турбогенераторов // Машины, технологии и материалы для современного машиностроения: сб. тез. конф. Москва: Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. С. 117. EDN: YTILEL.

Nazolin A. L. Vibroakusticheskaya diagnostika i resursosberegayushchaya ekspluatatsiya turbogeneratorov. [Vibroacoustic diagnostics and resource-saving operation of turbogenerators]. *Mashiny, Tekhnologii i Materialy dlya Sovremennoego Mashinostroeniya*. Moscow, 2018. P. 117. EDN: YTILEL. (In Russ.).

16. Кукис Д. В., Климова Т. Г., Тепикин Я. Е. [и др.]. Возможности и задачи непрерывного мониторинга параметров и состояния синхронных генераторов // Энергия единой сети. 2023. № 3-4 (70). С. 50–59. EDN: QSDRBK.

Kukis D. V., Klimova T. G., Tepikin Ya. E. [et al.]. Vozmozhnosti i zadachi nepreryvnogo monitoringa parametrov i sostoyaniya sinkhronnykh generatorov [The possibilities and tasks of continuous monitoring of the parameters and condition of synchronous generators]. *Energiya Edinoy Seti*. 2023. No. 3-4 (70). P. 50–59. EDN: QSDRBK. (In Russ.).

17. Боронин Д. А., Прокофьев А. Ю., Карелин В. С. [и др.]. Автоматизированная система мониторинга и предиктивной диагностики турбогенератора // X Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда»: сб. тез. Санкт-Петербург: ООО «Издательский дом Недра», 2023. С. 17–18. EDN: CYHFVS.

Boronin D. A., Prokof'ev A. Yu., Karel'lin V. S. [et al.]. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa i prediktivnoy diagnostiki turbogeneratora. [Automated system for monitoring and predictive diagnostics of a turbogenerator]. *X Mezhdunarodnaya Nauchno-prakticheskaya Konferentsiya Molodykh Uchenykh i Spetsialistov Atomnoy Otrasli "Komanda"*. Saint Petersburg, 2023. P. 17–18. EDN: CYHFVS. (In Russ.).

18. Лач С. Ю., Солёный С. В., Чабаненко А. В. Современные методы диагностики и мониторинга турбогенераторов во время работы, ремонта и технического обслуживания //

Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: сб. тез. докл. III Междунар. форума. Санкт-Петербург, 2023. Т. 1. С. 244–246. EDN: EDVPQR.

Lach S. Yu., Solenny S. V., Chabanenko A. V. Sovremennye metody diagnostiki i monitoringa turbogeneratorov vo vremya raboty, remonta i tekhnicheskogo obsluzhivaniya [Modern methods for diagnostics and monitoring of turbogenerators during operation, repair and maintenance]. *Matematicheskie Metody i Modeli v Vysokotekhnologichnom Proizvodstve*. Saint Petersburg, 2023. Vol. 1. P. 244–246. EDN: EDVPQR. (In Russ.).

19. Разумов Р. В., Соловьев М. Ю., Михайлов А. В. Системы мониторинга высоковольтного энергетического оборудования: мониторинг частичных разрядов во вращающихся электрических машинах // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 1 (42). С. 46–59. EDN: ARRTQR.

Razumov R. V., Solov'ev M. Yu., Mikhaylov A. V. Sistemy monitoringa vysokovol'tnogo energeticheskogo oborudovaniya: monitoring chasticchnykh razryadov vo vrashchayushchikhsya elektricheskikh mashinakh [Monitoring systems for high-voltage power equipment: monitoring partial discharges in rotating electrical machines]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya. Relay Protection and Automation*. 2021. No. 1 (42). P. 46–59. EDN: ARRTQR. (In Russ.).

20. Романов И. В. Ремонт по состоянию. Современные методы диагностики турбогенераторов // Энергетик. 2020. № 5. С. 30–32. EDN: WBTVA.

Romanov I. V. Remont po sostoyaniyu. sovremennye metody diagnostiki turbogeneratorov [Repair as required. Modern methods of turbine-type generators diagnostics]. *Energetik. Power & Electrical Engineering*. 2020. No. 5. P. 30–32. EDN: WBTVA. (In Russ.).

21. Polishchuk V. I., Sergeev V. L. Adaptive identification method of a signal from stray magnetic field sensor for turbogenerator diagnostics. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. 2015. Vol. 8, no. 2. P. 201–207. DOI: 10.17516/1997-1397-2015-8-2-201-207. EDN: VHQYWT.

22. Овчинников И. А., Попов И. В., Карелин В. С. [и др.]. Автоматизированная система мониторинга и предиктивной диагностики турбогенератора // Электротехнические комплексы и системы: материалы II Всерос. конф. по электрическим машинам в рамках Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: ООО «Аэтерна», 2023. С. 3–23. EDN: JNMNIV.

Ovchinnikov I. A., Popov I. V., Karel'lin V. S. [et al.]. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa i prediktivnoy diagnostiki turbogeneratora. [Automated system for monitoring and predictive diagnostics of a turbogenerator]. *Elektrotekhnicheskie Kompleksy i Sistemy*. Ufa, 2023. P. 3–23. EDN: JNMNIV. (In Russ.).

23. Литвин А. С., Мальцев И. А. Анализ методов неразрушающей диагностики и контроля узлов и элементов электрических машин переменного тока // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. 2024. Т. 1. С. 409–416. EDN: KLFBJH.

Litvin A. S., Mal'tsev I. A. Analiz metodov nerazrushayushchey diagnostiki i kontrolya uzlov i elementov elektricheskikh mashin peremennogo toka [Analysis of methods of non-destructive diagnostics and control of units and elements of AC electrical machines]. *Innovatsionnye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika. Innovative Technologies: Theory, Tools, Practice*. 2024. Vol. 1. P. 409–416. EDN: KLFBJH. (In Russ.).

ЯРОШЕНКО Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры механизации и автоматизации автодорожной отрасли Шахтинского автодорожного института (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова (ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова), г. Шахты.

ORCID: 0009-0003-3287-5012

Адрес для переписки: igoryaroshenko@mail.ru

НОСЕНКО Виктория Владимировна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры механизации и автоматизации автодорожной отрасли Шахтинского автодорожного института (филиал) ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова, г. Шахты.

SPIN-код: 1829-0233

AuthorID (РИНЦ): 621098

ORCID: 0000-0003-3003-8440

Адрес для переписки: vvnosenko@mail.ru

АЛТУНИНА Мария Сергеевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры механизации и автоматизации автодорожной отрасли Шахтинского автодорожного института (филиал) ЮРГПУ (НПИ) им. М. И. Платова, г. Шахты.

SPIN-код: 5438-7181

AuthorID (РИНЦ): 621093

ORCID: 0000-0001-5598-2564

Адрес для переписки: mariyaltunina@mail.ru

АКСЕНОВ Юрий Петрович, доктор технических наук, ведущий инженер по научно-технической информации ООО «Высоковольтные измерительные комплексы и системы», г. Балаково.

Адрес для переписки: diacsnew@list.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 07.02.2025; одобрена после рецензирования 22.04.2025; принята к публикации 15.05.2025.

YAROSHENKO Igor Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Mechanization and Automation of the Road Industry Department, Shakhty Automobile Institute (branch)

South-Russian State Polytechnic University named after M. I. Platov, Shakhty.

ORCID: 0009-0003-3287-5012

Correspondence address: igoryaroshenko@mail.ru

NOSENKO Victoria Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Mechanization and Automation of the Road Industry Department, Shakhty Automobile Institute (branch) South-Russian State Polytechnic University named after M. I. Platov, Shakhty.

SPIN-code: 1829-0233

AuthorID (RSCI): 621098

ORCID: 0000-0003-3003-8440

Correspondence address: vvnosenko@mail.ru

ALTUNINA Maria Sergeevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Mechanization and Automation of the Road Industry Department, Shakhty Automobile Institute (branch) South-Russian State Polytechnic University named after M. I. Platov, Shakhty.

SPIN-code: 5438-7181

AuthorID (RSCI): 621093

ORCID: 0000-0001-5598-2564

Correspondence address: mariyaltunina@mail.ru

AKSENOV Yuri Petrovich, Doctor of Technical Sciences, Leading Engineer in Scientific and Technical Information, LLC "High voltage measuring complexes and systems", Balakovo.

Correspondence address: diacsnew@list.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 07.02.2025; approved after reviewing 22.04.2025; accepted for publication 15.05.2025.