

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД  
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**  
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING  
COMMISSIONING OF EQUIPMENT  
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.314.222.6

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-06>

EDN ICZIKJ


Оригинальная статья / Original paper



## Методы определения внутренних повреждений силовых трансформаторов

**И.В. Мельников , В.В. Нечитайлов , В.Г. Бекетов ,  
И.Ю. Попова , Н.А. Снитко **

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета  
«МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация*

 [comosabe@mail.ru](mailto:comosabe@mail.ru)

**Аннотация.** В связи с разнообразием возникающих дефектов в электрических машинах, необходимо применение более эффективных методов контроля их состояния. По всему миру ведутся исследования и разработки новых средств и методов контроля мощных электрических машин во время их работы. Некоторыми примерами последних достижений являются вибродиагностические методы для оценки прессовки узлов внутри трансформатора, акустические и электрические системы контроля частичных разрядов, обработка данных с использованием цифровых методов, а также новые датчики для непрерывного контроля газов и влаги в масле, а также температуры наиболее нагретых точек. Дополнительно, тепловизионный контроль при осмотрах силового оборудования также является важным инструментом для обеспечения надежной работы. Считается, что наиболее эффективным методом является газохроматографический анализ масла, который позволяет выявить большинство дефектов в маслонаполненном оборудовании. В процессе эксплуатации, мощных электрических машин применение существующих методов неразрушающего контроля не позволяет установить полную оценку состояния главных частей оборудования, как показывает анализ мест повреждений 25% являются повреждение сердечника и обмотки. Особое значение приобретает эффективный контроль состояния и определение работоспособности трансформаторов, поскольку они являются ключевыми элементами эксплуатации атомных электростанций. В работе рассматривается возможность применения вихретокового метода контроля, определение дефекта стали магнитопровода основана на фиксации неравномерности магнитного поля на горизонтальных или вертикальных плоскостях ярма или стержня состоящих из пластин электротехнической стали. Мониторинг и оценка функционирования действующего оборудования, обнаружение недостатков на ранних этапах их развития, когда расходы на ремонт еще минимальны, предотвращение аварийных отказов становятся приоритетом. В соответствии с темпом роста обнаруженных недостатков контроль осуществляется время от времени или постоянно, максимальное количество контролируемых характеристик достигается при полной проверке трансформатора с целью определения его функциональности.

**Ключевые слова:** блочный повышающий трансформатор, вихретоковый контроль, коэффициент полезного действия, объект контроля, вихретоковый преобразователь, ферромагнетик, неразрушающий контроль.


**Для цитирования:** Мельников И.В., Нечитайлов В.В., Бекетов В.Г., Попова И.Ю., Снитко Н.А. Методы определения внутренних повреждений силовых трансформаторов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):43–51 <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-06>

**For citation:** Melnikov I.V., Nechitailov V.V., Beketov V.G., Popova I.Yu., Snitko N.A. Methods of determining internal damage in power transformers. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):43–51 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-06>

## Methods of determining internal damage in power transformers

**Ivan V. Melnikov , Vladimir V. Nechitailov , Vladimir G. Beketov ,  
Irina Yu. Popova , Natalia A. Snitko **

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation*

 [comosabe@mail.ru](mailto:comosabe@mail.ru)

**Abstract.** Due to the variety of defects that arise in electrical machines, it is necessary to use more effective methods for monitoring their condition. All over the world research and development of new means and methods for monitoring powerful electrical machines during their operation is underway. Some examples of recent advances are vibration diagnostic methods for assessing the compaction of components inside a transformer, acoustic and electrical systems for monitoring partial discharges, data processing using digital methods, and new sensors for continuous monitoring of gases and moisture in oil, as well as hot spot temperatures. Additionally,

thermal imaging testing of power equipment is also an important tool to ensure reliable operation. It is believed that the most effective method is gas chromatographic oil analysis, which can identify most defects in oil-filled equipment. During the operation of powerful electrical machines, the use of existing non-destructive testing methods does not allow a complete assessment of the condition of the main parts of the equipment, as an analysis of damage locations shows, 25% are damage to the core and windings. Effective monitoring of the condition and determination of the performance of transformers is of particular importance, since they are key elements in the operation of nuclear power plants. The paper considers the possibility of using the eddy current testing method; determining a defect in magnetic core steel is based on fixing the unevenness of the magnetic field on the horizontal or vertical planes of a yoke or rod consisting of electrical steel plates. Monitoring and evaluating the functioning of existing equipment, detecting deficiencies in the early stages of their development, when repair costs are still minimal, and preventing emergency failures become a priority. In accordance with the growth rate of detected deficiencies, monitoring is carried out from time to time or continuously, the maximum number of monitored characteristics is achieved when the transformer is fully tested to determine its functionality.

**Keywords:** block step-up transformer, eddy current testing, efficiency, test object, eddy current converter, ferromagnet, non-destructive testing.

## Введение

В настоящее время в энергетической отрасли наблюдаются эксплуатационные особенности, которые обуславливают повышенное внимание к надежности работы оборудования, включая силовые трансформаторы. Это привело к снижению инвестиций в обновление парка оборудования и появлению стремления максимально продлить срок эксплуатации уже используемых электрических машин.

Другой важной особенностью настоящего времени являются повышенные требования к качеству электроснабжения потребителей и надежности работы оборудования.

Для обеспечения надежной эксплуатации крупного силового оборудования, такого как трансформаторы мощностью 630 МВА (рис. 1), и шунтирующие реакторы типа РОМБСМ – 60000/500<sup>1</sup>, установленные на Ростовской АЭС, особое внимание следует уделять эффективному контролю состояния данного оборудования. Это наиболее важно в условиях эксплуатации в Южном регионе.

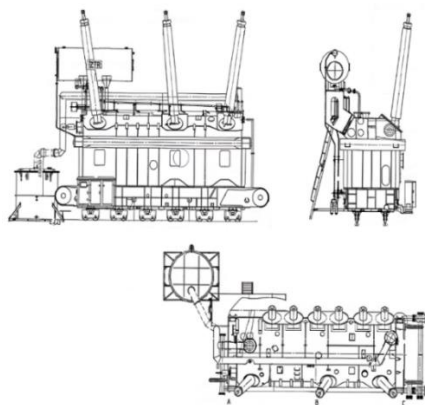


Рисунок 1. Трансформатор ТЦ-630000 кВА<sup>2</sup>  
Figure 1. Transformer TC-630000 kVA<sup>2</sup>

Контролируется состояние в процессе эксплуатации и при периодических диагностиках по поддержанию работоспособности, особенно высокие требования предъявляются к блочным повышающим трансформаторам далее (БПТ) входящие в состав блока «генератор – трансформатор». Работа энергоблока непосредственно зависит от нормального режима работы БПТ и его выход из строя может привести к отключению всего блока, что в свою очередь может стать причиной разрушения энергосистемы. Для энергоблоков атомных электростанций невозможность выдавать энергию при работающем реакторе считается аварийной ситуацией. Кроме того, большая ответственность за работу всей энергосети лежит на крупных автотрансформаторах межсистемных связей и узловых подстанциях.

Для достижения высокой готовности оборудования, сокращения времени простоя и уменьшения затрат на ремонт, а также для увеличения срока службы, критически важно активно выявлять дефекты в работе и обнаруживать их на ранних стадиях. Таким образом возможно принимать своевременные и эффективные решения по их устранению и предотвращать возникновение аварийных ситуаций.<sup>3</sup>

Во время работы силовых трансформаторов необходимо контролировать их режим, включая нагрузку, рабочие напряжения и их соответствие требованиям. Учитывается длительность и частота возникновения перегрузок и перенапряжений как силового оборудования, так и во внешней сети. При необходимости проводятся обследования состояния трансформаторов. В данной статье не рассматриваются повседневный контроль режима работы и осмотры, которые являются частью процедуры эксплуатации трансформаторов.

## Методы контроля электрических машин

В рамках испытаний без отключения трансформаторов от сети проводятся следующие основные мето-

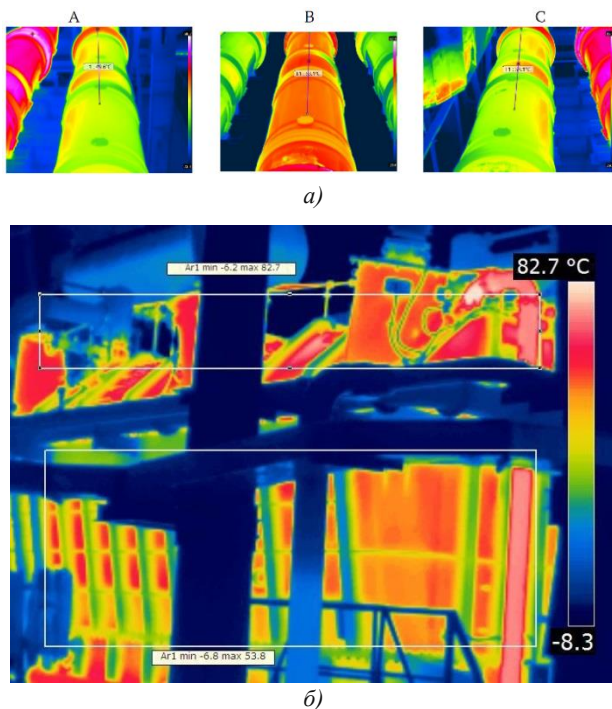
<sup>1</sup> Рожкова Л.Д., Корнеева Л.К., Чиркова Т.В. Электрооборудование электрических станций и подстанций. – Москва: Академия, 2004. – 448 с. – Режим доступа: <https://libcats.org/book/584202.?ysclid=ltbgjtw7zf785312567> (дата обращения 10.10.2023).

<sup>2</sup> Инструкция по эксплуатации блочных трансформаторов энергоблока №3 ЗГТ-1, ЗГТ-2. – РоАЭС, 2019. – 56 с.

<sup>3</sup> Мусаэлян Э.С. Наладка и испытание электрооборудования электростанций и подстанций. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 504 с. – Режим доступа: <https://www.elec.ru/files/2020/01/10/musaelyan-es-naladka-i-ispytanie-elektrooborudovan.PDF> (дата обращения 23.10.2023).

дики: измерение частичных разрядов (ЧР), контроль вибраций, телевизионный контроль (рис. 2), ультразвуковая дефектоскопия, измерение сопротивления короткого замыкания (Зк) под нагрузкой, определение тангенса угла потерь, емкости остаточного тока и небаланса в трехфазной системе, а также отбор проб масла для последующих анализов.

Для непрерывного контроля состояния БПТ используется: газохроматографический анализ растворенных в масле газов (ГХА), измерение и локализация частичных разрядов, определение температуры наиболее нагретой точки далее (ТННТ) обмотки трансформатора.



**Рисунок 2.** Снимки активной части трансформатора (б), место соединения токопровода со стороны низкого напряжения 24 кВ (а) трансформатора [составлено авторами]

**Figure 2.** Images of the transformer active part (b), the place of connection of the current collector with the low voltage side of the 24 kV (a) transformer [compiled by the authors]

Контроль теплового состояния силовых машин является важной задачей при эксплуатации и изменении режима в энергосистеме. Для осуществления такого контроля применяются как косвенные методы, так и методы измерения ТННТ трансформатора, такие измерения позволяют оценить перегрузочную способность. Контроль во время работы позволяет определить оптимальное количество работающих вентиляторов и насосов в зависимости от окружающей температуры и нагрузки на трансформатор. Это помогает повысить КПД системы, уменьшить потери в системе охлаждения и предотвращать возможные дефекты в активной части трансформатора [1:110–131].

#### Анализ повреждений оборудования

Для выявления повреждений в магнитопроводах, связанных с дефектами в межлистовой изоляции и с нарушением изоляции вспомогательных деталей,

производят испытание качества изоляции стяжных шпилек, ярмовых балок, межлистовой изоляции активной стали магнитопровода, измерение потерь и тока холостого хода.

Для наглядности анализа и определения степени надежности работы трансформаторов необходимо иметь представительную выборку эксплуатационных данных, указанных в таблице 1, а также информацию о аномальных режимах отдельных узлов:

- дифференциация повреждений по основным узлам трансформаторов разных классов напряжений;
- характеристики степени повреждений;
- причины и тяжесть в последствии при коротких замыканиях;
- период повреждений в зависимости от срока службы трансформаторов.

**Таблица 1.** Повреждения силовых трансформаторов основных частей, с учетом продолжительности их эксплуатации [составлено авторами с использованием данных ЕЭС России <sup>4</sup>]

**Table 1.** Damage of power transformers of main parts taking into account the duration of their operation [compiled by the authors using data from the Unified Energy System of Russia <sup>4</sup>]

Узел	Число повреждений по продолжительности эксплуатации					Всего
	10 лет	10-20 лет	20-30 лет	30-40 лет	более 40 лет	
Обмотки	13	17	23	19	12	116
Магнитопровод	2	6	7	12	14	41
РПН	12	18	21	10	8	69
Вводы	15	17	18	31	9	90
Течь масла	12	16	19	11	3	61

Анализ показал, что внутренние короткие замыкания в трансформаторах напряжением 110-500 кВ в основном происходят из-за повреждений разъемных присоединений, высоковольтных вводов, корпусов и обмоток трансформаторов. Наиболее тяжелые последствия могут возникать на этапе сборки, но в основном в процессе эксплуатации силового оборудования:

- снижение электрической прочности масляного канала высоковольтных герметичных вводов из-за отложения осадка на внутренней поверхности фарфора и на поверхности внутренней изоляции, а также из-за коллоидного старения масла;
- скопление и образование влаги, загрязнение и износ изоляции обмоток трансформаторов;
- спекание, разрушение изоляции в результате термического воздействия на обмотку из-за длитель-

<sup>4</sup> Системный оператор Единой энергетической системы (ЕЭС России). – Режим доступа: [https://www.sos-ops.ru/functioning/ups/indicators/ees-temperature/?tx\\_mscdugraph\\_pi%5Bcontroller%5D=Graph&tx\\_mscdugraph\\_pi%5Baction%5D=fullview&tx\\_mscdugraph\\_pi%5BviewDate%5D=2024-03-06&tx\\_mscdugraph\\_pi%5BviewKpo%5D=550000](https://www.sos-ops.ru/functioning/ups/indicators/ees-temperature/?tx_mscdugraph_pi%5Bcontroller%5D=Graph&tx_mscdugraph_pi%5Baction%5D=fullview&tx_mscdugraph_pi%5BviewDate%5D=2024-03-06&tx_mscdugraph_pi%5BviewKpo%5D=550000) (дата обращения: 10.10.2023).



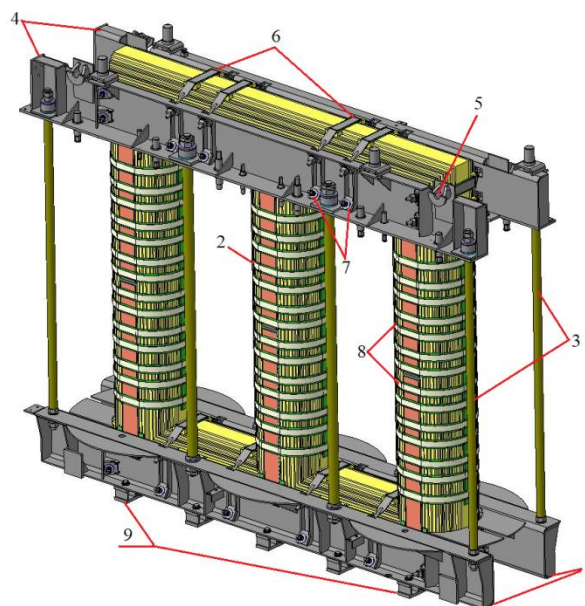
ного неотключения сквозного тока КЗ на стороне низшего напряжения трансформатора;

- снижение изоляционных свойств активной стали;
- некачественный монтаж, ремонт.

К распространенным повреждениям магнитопровода (рис. 3) относятся: общее старение межлистовой изоляции, местные перегревы под действием вихревых токов или токов, наводимых в короткозамкнутых контурах, образующихся в результате нарушения изоляции активной стали в местах соприкосновения с центрирующими втулками ярмовых балок 1 и 4, винтами для прессовки обмоток 7, забоинами и т.п., а также нарушения схемы заземления. Дефекты в магнитопроводе могут формироваться еще при сборке трансформатора, в активной стали, при прессовке продавливают изоляцию соседних пластин и образуют каналы внутри сечения ярма или стержня, формируя короткозамкнутый виток. Если такой дефект еще не вызвал заметных следов «пожара стали», то при таких повреждениях изоляции межлистовой стали вихревые токи складываются и приводят к выгоранию пластин, которые можно устранить только их полной заменой и обнаружить такие дефекты в собранном трансформаторе крайне трудно. Такие дефекты большей частью отмечаются на стыках стержней и ярм, ближе к внутренним углам окна магнитопровода. Это объясняется тем, что во внутренних углах магнитопровода имеет место наибольшая индукция магнитного поля. Необходимо помнить о еще одном опасном повреждении магнитопровода, при конденсации влаги на поверхности масла возможно выпадение осадка на верхнее ярмо. Частицы жидкости попадают в межлистовую сталь трансформатора, с нагретым маслом образуют смесь водомасляной эмульсии, которая в процессе эксплуатации действует на изоляционные свойства и способствует формированию коррозии стали. Помимо этого, водомасляная эмульсия, стекая по стержням 2, накапливается в более холодной зоне ярма, при переходе влаги в масло происходит увлажнение нижней ярмовой изоляции, цилиндров и барьеров и наступает пробой с обмоток на активную сталь магнитопровода, это наиболее тяжелая авария, особенно на крупных силовых трансформаторах с выходом из строя обмоток и магнитопровода [2]<sup>5</sup>.

#### Структура физико-химических свойств металла

В настоящее время разработки методов поиска диагностических параметров, которые могли бы однозначно определить связь надежности изоляции листов на основе измеренных характеристик при проведении неразрушающих испытаний не дают однозначных результатов. Из этого следует необходимость



**Рисунок 3.** Трехфазная магнитная система с прессовкой стержней стеклобандажками, где 1 – нижние ярмовые балки, 2 – стержень магнитопровода, 3 – вертикальные связующие шпильки с бумажно-бакелитовыми трубками, 4 – верхние ярмовые балки, 5 – подъемные планки, 6 – полубандажки (стяжки), 7 – винты для прессовки обмоток, 8 – стеклобандажки, 9 – стальные опорные пластины [составлено авторами, программа DesignSpark Mechanical]  
**Figure 3.** Three-phase magnetic system with pressing of rods by glass bandages, where 1 – lower yoke beams, 2 – magnetic core rod, 3 – vertical connecting studs with paper-bakelite tubes, 4 – upper yoke beams, 5 – lifting bars, 6 – half-bandages (ties), 7 – screws for pressing of windings, 8 – glass bandages, 9 – steel support plates [compiled by the authors, DesignSpark Mechanical Programme]

применения оптимально подобранного комплекса методов для контроля и оценки состояния активной части трансформатора как в процессе его сборки, так и во время эксплуатации.

Применение вихретокового контроля для диагностирования магнитопровода трансформаторов позволит определять, эксплуатационный ресурс активной части в процессе его работы, а также состояние стали во время формирования сердечника электрических машин.

Во многих случаях методы неразрушающего контроля используются для обнаружения дефектов структуры, оценки физико-химических свойств изделий после различного рода термических, деформационных или других воздействий в процессе изготовления и эксплуатации. Для точного обнаружения разнообразных дефектов в материалах и изделиях крайне важны методы контроля качества, основанные на анализе изменений физических свойств материала. Эти методы, известные как неразрушающие, помогают выявить дефекты и определить их причины – это ключевой аспект обеспечения высокого качества продукции.

Основой электромагнитных методов контроля качества термической, химико-термической и прочих видов обработок является зависимость магнитных и

<sup>5</sup> Сергеевков Б.Н., Киселев В.М., Акимов Н.А. Электрические машины: Трансформаторы. – Москва: Высшая школа, 1989. – 352 с. Режим доступа: <https://reallib.org/reader?file=585659&ysclid=ltbi3x7ccy361779745> (дата обращения 25.10.2023).

электрических свойств от изменений структуры металла, которые происходят в процессе этих обработок. Этот взаимосвязанный механизм представляет собой сложную динамику, влияние различных факторов на которую требует детального изучения. Поэтому нет универсального закона, который бы позволял заменить механические и металлографические исследования магнитным или электрическим методом контроля без предварительного анализа конкретного случая. В каждом состоянии и в определенном случае, от состава стали и специфических ее свойств, полученный результат полученных обработок, выбирается соответствующий магнитный или электрический параметр (какая-либо из магнитных проницаемостей  $\mu_n$ ,  $\mu_{max}$  и др., коэрцитивная сила  $H_c$ , намагниченность насыщения  $M_s$ , удельное электросопротивление  $\rho$  и др.), наиболее легко измеряемый и максимально чувствительный к интересующим нас свойствам изделий.

В зависимости от выбранного параметра, формы и размеров изделия, подлежащего контролю, разрабатывается специализированная аппаратура, которая позволяет быстро и точно оценивать механические и другие эксплуатационные характеристики изделия на основе его магнитных и электрических свойств.

Магнитный структурно-фазовый анализ представляет собой специализированный метод исследования магнитных свойств материалов, который не только позволяет изучить магнитные параметры конкретного изделия или сплава, но также провести оценку его физических характеристик, химического состава и особенностей происходящих в нем физических явлений.

Одним из ключевых аспектов структуры металла являются дефекты кристаллического строения, такие как вакансии, дислокации, дефекты упаковки и незначительные примеси атомов. Необходимо отметить, что введение значительного количества атомов в металл приводит к изменению его состава и не может рассматриваться как дефект структуры, а скорее, как процесс легирования, влияющий на фазовое состояние металла. Значительное влияние на физические свойства металла оказывают внутренние напряжения и границы зерен. Современные модели объясняют это воздействие, рассматривая напряжения и границы зерен как совокупность дефектов в кристаллической структуре. Поэтому, когда мы рассматриваем влияние структуры на свойства, в первую очередь мы имеем в виду зависимость свойств от дефектов строения. К структурным особенностям поликристаллических материалов, которые влияют на их свойства, относятся кристаллическая текстура. Степень ее совершенства или ее отсутствие также оказывают влияние на значения свойств, которые чувствительны к анизотропии кристалла.

Помимо текстуры, обусловленной кристаллической анизотропией, структурно-чувствительные свойства двух- и многофазных сплавов также зависят от распределения фазовых компонентов в пространстве. Таким образом, структурная чувствительность этих

свойств проявляется через влияние кристаллических дефектов и текстуры на них <sup>6</sup> [3].

### Принцип работы и способ применения метода ВТК

Вихретоковый контроль основан на анализе воздействия внешнего электромагнитного поля на электромагнитное поле, порождаемого вихревыми токами, возникающими в объекте при его воздействии. Площадь и насыщенность вихревых токов зависит от параметров объекта контроля, его геометрической составляющей и электромагнитных характеристик, а также расположением сердечника с электромагнитным полем и объекта контроля (ОК). В данном случае в качестве источника электромагнитного поля выступает индуктивная катушка, через которую пропускается синусоидальный ток. Эта катушка называется вихретоковым преобразователем (рис. 4), где обмотка для приема сигнала (1), обмотка возбуждения (2) и обмотка, применяемая для компенсации влияния обмотки возбуждения (3) размещены в платформе (5), данная платформа позволяет разместить в себе сердечник (4), обмотки пропитаны компаундом (6), с целью защитить их от разрушения при наложении ферритового экрана (7), также датчик помещен в корундовую шайбу (8), которая защищает сердечник (4) от контакта с объектом контроля [4].

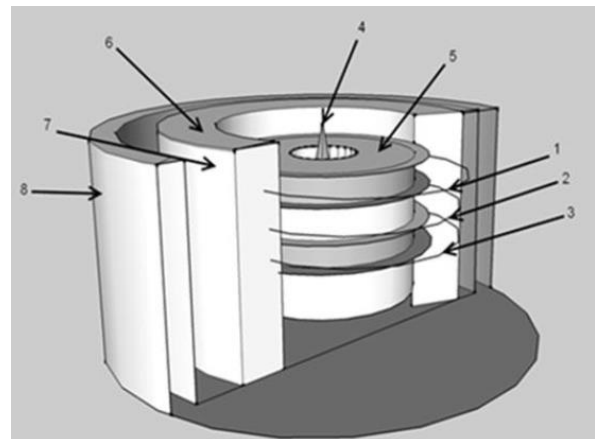


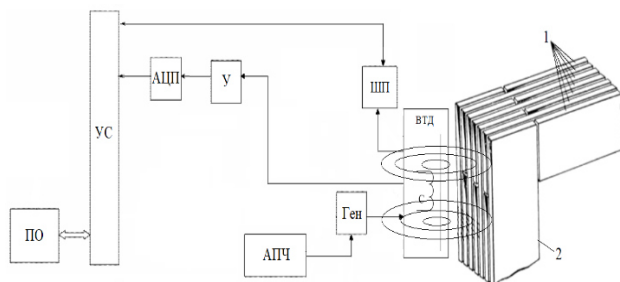
Рисунок 4. Вихретоковый преобразователь [4]

Figure 4. An eddy current transducer [4]

При наличии вблизи ОК такой катушки (рис. 5) от источника генерации в измерительной катушке (С) и прохождении синусоидального сигнала по обмотке возбуждения преобразователя, наводится электромагнитное поле, данное поле наводит электродвижущую силу в измерительной обмотке, эта ЭДС передается на усилитель (У) для увеличения необходимых частот в диапазоне от 2000 до 200000 Гц, частота преобразований, обеспечивает удовлетворительную дискретизацию высокочастотных составляющих, после чего

<sup>6</sup> Веста. Система контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации, контроль состояния маслонасосов. Руководство по эксплуатации. Пермь, 2015. 60 с. Режим доступа: [https://dimrus.com/manuals/vesta\\_um.pdf](https://dimrus.com/manuals/vesta_um.pdf) (дата обращения 05.11.2023).

данные измерения поступают в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), где проходит процедуру перехода в цифровой вид.



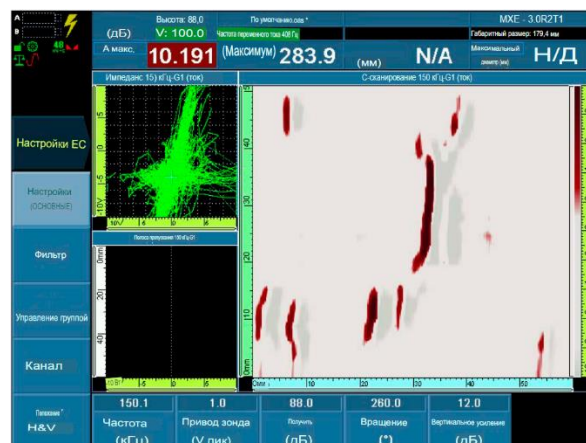
**Рисунок 5.** Структурная схема вихретокового метода контроля на системе с прямым стыкованием пластин шихтованного магнитопровода: ВТД – вихретоковый датчик, Ген – генератор, ПО – программное обеспечение, У – усилитель, АПЧ – автоматическая подстройка частоты генератора, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ШП – шаговый привод сканирующего устройства, УС – устройство сопряжения, С – измерительная катушка, 1 – ярмо магнитопровода, 2 – стержень [составлено авторами]

**Figure 5.** Structural scheme of eddy current method of control on the system with direct joining of the plates of the charge-coupled magnetic core: ВТД – eddy current sensor, Ген – generator, ПО – software, У – amplifier, АПЧ – automatic frequency adjustment of the generator, АЦП – analogue-to-digital converter, ШП – stepper drive of the scanning device, УС – interface device, С – measuring coil, 1 – yoke of the magnetic core, 2 – rod [compiled by the authors]

Оцифрованный сигнал обрабатывается на устройстве сопряжения (УС) тем самым происходит отображение результатов в программном обеспечении (ПО), (рис. 6). Шаговый привод сканирующего устройства обеспечивает двухкоординатное перемещение ВТД по заданной траектории, что позволяет производить сканирование ярма (1) или стержня (2) магнитопровода и получать информацию о состоянии поверхностного слоя, запись сканов полезна для контроля динамики развития дефектов, установить область возникновения и ведение архива на протяжении всего срока эксплуатации агрегата. Автоматическая подстройка частоты генератора (АПЧ) дает возможность оператору изменять пределы измерений путем внесения исходных данных о конструкции и материала активной части трансформатора.

Использование матрицы позволяет создавать и сохранять результаты контроля в форме изображения С-скана: визуализации поверхности проверяемого объекта с выделенными дефектами. Энкодер, обычно интегрированный в вихретоковый матричный преобразователь, обеспечивает возможность геопривязки, что позволяет оценить размеры дефектов. Использование записи С-скана является важным инструментом для мониторинга прогресса развития дефектов, оценки производительности дефектоскописта и упрощения процесса документирования контрольных результатов.

Характеристики электродвижущей силы в измерительной катушке будут зависеть от свойств ОК и вза-

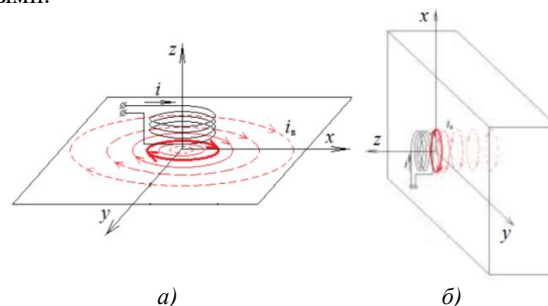


**Рисунок 6.** Отображение результатов контроля при использовании С-скана активной части трансформатора [составлено авторами]

**Figure 6.** Display of inspection results when using the C-scan of the transformer core [compiled by authors]

имногорасположения вихретокового преобразователя и ОК. Если объект контроля является немагнитным проводником, электродинамический сигнал будет иметь гармоническую форму и будет характеризоваться амплитудой и фазой. В случае, если объект контроля является ферромагнитным, электродинамический сигнал в измерительной катушке будет зависеть от характера намагничивания объекта, таких как магнитное поле, исходная намагниченность и другие факторы.

Как показано на (рис. 7), плотность вихревых токов  $j_v$  достигает максимума под витками обмотки возбуждения [4]. Электрические параметры катушки (параметрический преобразователь) или электродвижущая сила в измерительной обмотке (трансформаторный преобразователь) остаются практически постоянными.



**Рисунок 7.** Распределение плотности вихревых токов в токопроводящей среде: в поверхностном слое (а); по глубине объекта (б) [4]

**Figure 7.** Distribution of eddy current density in the conductive medium: in the surface layer (a); along the depth of the object [4]

Учитывая цилиндрическую форму катушек, контуры вихревых токов имеют вид концентрических окружностей. Если катушка с током расположена на поверхности объекта, то максимальная плотность вихревых токов проявляется в контуре, приближенном к контуру самой катушки. В случае появления дефектов (трещин, полостей и т.д.) контур вихревых



токов изменяется, а, следовательно, изменяется и сигнал ВТП.

Контроль ферромагнитных объектов имеет свою особенность – их магнитные свойства сильно влияют на годографы сигналов ВТП. Изменения в магнитных свойствах объекта могут создавать сложности при использовании вихретоковых приборов, но также позволяют контролировать такие характеристики, как твердость, механические напряжения и степень повреждения от усталости. Контроль ферромагнитных и неферромагнитных объектов отличается в том, что годографы сигналов ВТП для ферромагнитных объектов зависят от напряженности поля возбуждения. При контроле ферромагнитных материалов также используются высшие гармоники напряжения ВТП в качестве информативных параметров сигнала ВТП, так как магнитные характеристики материалов ОК являются нелинейными.

Годограф находится в четвертом квадранте комплексной плоскости и отображает изменение вносимого напряжения для материалов с коэффициентом  $\mu=1$ . Вносимое напряжение представляет собой изменение напряжения на выводах измерительной обмотки ВТП, вызванное влиянием объекта контроля на его электромагнитное поле (согласно ГОСТ 24289-80). Стрелка на годографе показывает изменение обобщенного параметра  $\beta$ , который связан с повышением удельной электрической проводимости объекта контроля. Годографы стремятся в первый квадрант комплексной плоскости при изменении относительной магнитной проницаемости.

На рисунке 8 представлены годографы для разных значений магнитной проницаемости:  $\mu=2$ ,  $\mu=5$  и  $\mu \rightarrow \infty$ . Направление увеличения  $\mu$  обозначено стрелкой. Важно отметить, что невозможно провести отдельный контроль электропроводности и магнитной проницаемости материалов, исходя только из изменения амплитуды напряжения измерительной обмотки ВТП. Приняв вектор напряжения  $a$  в качестве исходного, то при увеличении удельной электрической проводимости (значение  $\beta$  изменяется с 1,25 до 2,5), амплитуда (длина вектора) значительно увеличивается, в то время как фаза изменяется незначительно (вектор остается в четвертом квадранте комплексной плоскости). При увеличении магнитной проницаемости (значение изменяется с 1 до 2) также наблюдается существенное увеличение амплитуды (новое положение обозначено вектором  $c$ ).

На то какой сигнал будет формироваться на измерительной катушке (или катушках дифференциального датчика), то есть какова будет амплитуда и фаза колебаний, генерируемых на ней, зависит от нескольких параметров, которые сведены в обобщенный параметр вихретокового контроля, для накладных преобразователей он обозначается чаще всего символом  $\beta$  и описывается формулой (1):

$$\beta = r_{\text{вк}} \sqrt{2\pi f \mu \mu_0 \sigma}, \quad (1)$$

где  $r_{\text{вк}}$  – радиус возбуждающей катушки;

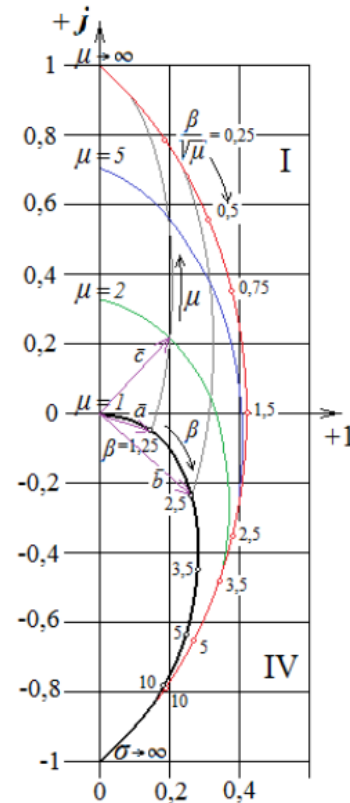


Рисунок 8. Годографы вносимого напряжения накладного ВТП над ферромагнитным материалом [составлено авторами]

Figure 8. Insertion voltage hodographs of superimposed HTP over ferromagnetic material [compiled by the authors]

$\sigma$  – удельная электрическая проводимость материала объекта;

$\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость материала объекта.

При проведении  $r_{\text{вк}}$  контроля требуемого параметра в металле, важно учитывать его магнитную проницаемость и удельную электрическую проводимость. Это позволяет подобрать оптимальную частоту возбуждающего тока и радиус преобразователя, чтобы достичь наибольшей чувствительности и минимизировать влияние нежелательных факторов. Проводимость, в свою очередь, является характеристикой способности проводника пропускать электрический ток и обратно пропорциональна его сопротивлению, выражение (2):

$$g = \frac{1}{R}. \quad (2)$$

Проводимость проводника зависит от его геометрических размеров и удельного сопротивления материала, из которого изготовлен проводник, выражение (3):

$$g = \sigma \frac{s}{l}, \quad (3)$$

где, удельная электрическая проводимость материала (обозначаемая как  $\sigma$ ) определяется как отношение площади поперечного сечения проводника (обозначаемая как  $s$ ) к его длине (обозначаемая как  $l$ ). Важно отметить, что проводимость материала зависит от температуры [5]. Когда металл нагревается, амплиту-

да и частота колебаний атомов в узлах кристаллической решетки увеличиваются. Это, в свою очередь, приводит к увеличению сопротивления движению электронов (или электрическому току) и, как следствие, снижению удельной проводимости материала представленные в таблице 2.

Таблица 2. Электропроводимость металлов [5]  
Table 2. Electrical conductivity of metals [5]

Металлы с самой высокой электропроводимостью		Распространенные металлы и сплавы		Металлы и сплавы с самой низкой электропроводимостью	
Металл	$\sigma$ , МСм/м	Металл	$\sigma$ , МСм/м	Металл	$\sigma$ , МСм/м
Медь	58,1	Литая сталь	7,8	Титан	1,96
Алюминий	37	Железо	10	Бронза	1,8
Свинец	4,8	Никель	4,5	Цинк	16,9

### Выводы

Вихретоковый контроль обладает рядом преимуществ, включая возможность координации без физи-

ческого контакта между объектом контроля (ОК) и проверяющим устройством (ВТП), что делает его методом бесконтактного контроля. Этот подход позволяет использовать вихретоковый контроль при движении ОК относительно ВТП даже на высоких скоростях, обеспечивая высокую эффективность контроля. Получение первичной информации в виде электрических сигналов без необходимости контакта и с высокой производительностью предоставляет значительные возможности для автоматизации процесса контроля вихретоков.

Одним из дополнительных преимуществ вихретокового контроля является его устойчивость к влажности, давлению и загрязнениям газовой среды, а также радиоактивному излучению и поверхностным загрязнениям непроводящими веществами. Кроме того, конструкция вихретокового контроля проста и надежна. Катушки вихретокового контроля обычно помещают в защитный корпус, что делает их устойчивыми к механическим и атмосферным воздействиям, и обеспечивает их надежность в качестве первичных преобразователей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. Москва: ЭНАС, 2002. 211 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000968074> (дата обращения 18.10.2023).  
Alekseev B.A. Condition monitoring (diagnostics) of large power transformers. Moscow: EHNAS, 2002. 211 p. (In Russ.) Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000968074> (accessed: 18.10.2023).
2. Антонов Г.В. Ремонт трансформаторов 110 кВ. и выше. Москва: Энергия, 1968. 87 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005946122> (дата обращения 25.10.2023).  
Antonov G.V. Repair of transformers 110 kV and above. Moscow: Energia, 1968. 87 p. (In Russ.) Available at: <https://bibliozal.ru/books/biblioteka-elektromontera/bem262-remont-transformatorov-110-kv-i-vyshe.html?ysclid=ltbhygy2312140194> (accessed 25.10.2023).
3. Лазарев И.В. Осевые усилия в элементах активной части силового трансформатора при запрессовке обмоток, изменении температуры и влагосодержания изоляционных материалов. *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2014;5:38–43. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=stgwkt> (дата обращения 12.11.2023).  
Lazarev I.V. Axial forces in the elements of the active part of a power transformer during pressing of windings, changes in temperature and moisture content of insulating materials. *EHLEKTRO. Ehlektrotehnika, ehlektroehnergetika, ehlektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2014;5:38–43. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=stgwkt> (accessed: 12.11.2023).
4. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. Монография. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 264 с. Режим доступа: [https://www.imach.uran.ru/lab/ltd/publ/publ\\_4.html](https://www.imach.uran.ru/lab/ltd/publ/publ_4.html) (дата обращения 14.11.2023).  
Shcherbinin V.E., Gorkunov E.S. Magnetic quality control of metals. Monograph. Ekaterinburg: Ural'skoe otделение Rossiiskoi akademii nauk, 1996. 264 s. (In Russ.) Available at: [https://www.imach.uran.ru/lab/ltd/publ/publ\\_4.html](https://www.imach.uran.ru/lab/ltd/publ/publ_4.html) (accessed: 11.14.2023).
5. Чернев К.К. Мощные трансформаторы. Москва: Энергия, 1978. 120 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/qrw3Y5Awzh3h3?ysclid=ltbigsqrw8358467986> (дата обращения 14.11.2023).  
Chernev K.K. Powerful transformers. Moscow: Ehnergiya, 1978. 120 s. (In Russ.) Available at: <https://djvu.online/file/qrw3Y5Awzh3h3?ysclid=ltbigsqrw8358467986> (accessed: 14.11.2023).

### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Мельников И.В.** – обследование и анализ работы силового оборудования, разработка, принятие решений;  
**Нечитайлов В.В.** – практическая ценность и применение методики на производстве;  
**Бекетов В.Г.** – математический анализ, структурная чувствительность физико-механических свойств материалов;  
**Попова И.Ю.** – основные опасные и вредные производственные факторы при эксплуатации оборудования на энергопредприятиях;  
**Снитко Н.А.** – охрана труда и техника безопасности на объектах энергетической отрасли.

### AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Melnikov I.V.** – inspection and analysis of the operation of power equipment, development, decision-making;  
**Nechitailov V.V.** – practical value and application of the methodology in production;  
**Beketov V.G.** – mathematical analysis, structural sensitivity of physical and mechanical properties of materials;  
**Popova I.Yu.** – the main dangerous and harmful production factors during the operation of equipment at energy enterprises;  
**Snitko N.A.** – occupational health and safety at energy industry facilities.



**ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:**

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:**

Конфликта интересов нет.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Иван Викторович Мельников**, оператор электрооборудования энергоблока, Концерн «Росэнергоатом» Ростовская атомная станция Волгодонск-28; старший преподаватель кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8613-9083>

WoS Researcher ID: AHH-5335-2020

e-mail: comosabe@mail.ru

**Владимир Владимирович Нечитайлов**, старший преподаватель кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6795-2458>

e-mail: VITikafAE@mephi.ru

**Владимир Георгиевич Бекетов**, кандидат технических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0242-6745>

e-mail: VGBeketov@mephi.ru

**Ирина Юрьевна Попова**, кандидат технических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1314-4091>

e-mail: Lhamo11@mail.ru

**Наталья Анатольевна Снитко**, старший преподаватель кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3118-3244>

e-mail: NASnitko@mephi.ru

**FUNDING:**

The study was carried out without external funding sources.

**CONFLICT OF INTEREST:**

No conflicts of interest.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:**

**Ivan V. Melnikov**, power unit electrical equipment operator, Rosenergoatom Concern Rostov Nuclear Power Plant Volgodonsk-28; Senior Lecturer, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8613-9083>

WoS Researcher ID: AHH-5335-2020

e-mail: comosabe@mail.ru

**Vladimir V. Nechitailov**, Senior Lecturer, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6795-2458>

e-mail: VITikafAE@mephi.ru

**Vladimir G. Beketov**, Can. Sci. (Engin.), Assistant professor, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0242-6745>

e-mail: VGBeketov@mephi.ru

**Irina Yu. Popova**, Can. Sci. (Engin.), Assistant professor, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1314-4091>

e-mail: Lhamo11@mail.ru

**Natalia A. Snitko**, Senior Lecturer, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3118-3244>

e-mail: NASnitko@mephi.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023

После доработки 01.02.2024

Принята к публикации 08.02.2024

Received 30.11.2023

Revision 01.02.2024

Accepted 08.02.2024