

## Успехи в науках о технике

## Achievements in Industrial Sciences / Fortschritte in den technischen Wissenschaften

УДК 620.179:621.311



**Кацер Ю.Д.**

### **Исследование характеристик датчиков контроля вибрации оборудования АЭС и ТЭС с помощью калибровочной системы**

Кацер Юрий Дмитриевич, студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0002-5468-4079>

E-mail: yuriy-d-katser@j-spacetime.com; katseryuriy@gmail.com

На показания вихретоковых датчиков влияют различные факторы, что вынуждает исследовать степень этого влияние и, при необходимости, пути его устранения. В работе представлены результаты исследования зависимости характеристик вихретоковых датчиков от размеров и материала объекта измерений, а также влияние наличия боковой преграды на характеристики датчиков. Подтверждено существование зависимости показаний вихретоковых преобразователей от различных факторов, что делает невозможным использование стандартной характеристикой датчиков из-за значительного отклонения для различных значений изменяющихся параметров. Калибровка в нестандартных условиях предложена в качестве одного из возможных путей нахождения действительных характеристик вихретоковых датчиков с целью повышению надежности и экономической эффективности АЭС и ТЭС.

**Ключевые слова:** калибровка измерительного прибора; погрешность измерения; вихретоковые преобразователи; измерительная система; система калибровки; точность измерений.

#### **Введение**

Остановки или разгрузки турбинных установок (ТУ), связанные с нарушением целостности деталей, влекут за собой большие убытки и, как следствие, повышение тарифов тепло-, электроснабжения. Поэтому к оборудованию атомных и тепловых электрических станций (АЭС, ТЭС) предъявляются высокие требования по надежности. Это означает необходимость постоянной диагностики состояния деталей ТУ. С этой целью используются системы вибродиагностики, позволяющие контролировать вибрации валов, подшипниковых узлов ТУ, циркуляционных насосов (ЦН) и другого оборудования. Для ТУ контроль вибраций позволяет отслеживать зарождение усталостных трещин, которые в большинстве случаев предшествуют внезапному отрыву лопаток, и других дефектов [Трояновский и др. 1985]. Применительно к ЦН, подробный анализ работы и состояния насосов ВВЭР-1000 перед нарушениями режимов нормальной эксплуатации приведен в работе С.Т. Лескина [Лескин и др. 2016, с. 16–20]. Данный анализ проводился с помощью средств вибродиагностики и доказал возможность определения аномалий в состоянии насосов задолго до обнаружения нарушений нормальной эксплуатации штатными системами контроля. Проблема контроля работы оборудования и обоснование необходимости использования датчиков вибрации и си-

**КАЦЕР Ю.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И ТЭС  
С ПОМОЩЬЮ КАЛИБРОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ**

стем диагностики на ТЭЦ приведены в работе А.С. Хвостикова [Хвостиков и др. 2012, с. 81–82].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод об исключительной важности систем вибродиагностики применительно к АЭС и ТЭС.

**Неопределенность показаний датчиков**

Анализ состояния устройств производится на основе показаний датчиков, иначе говоря, достоверность выдаваемых системой диагнозов напрямую зависит от точности этих показаний. Существенная погрешность может стать причиной неверного диагностирования дефектов оборудования, установления некорректных сроков допустимой эксплуатации ТУ и мер устранения дефектов. В связи с этим стоит ответственно относиться к исследованию неопределенностей, вносимых различными факторами, их величин, а также возможных путей их устранения.

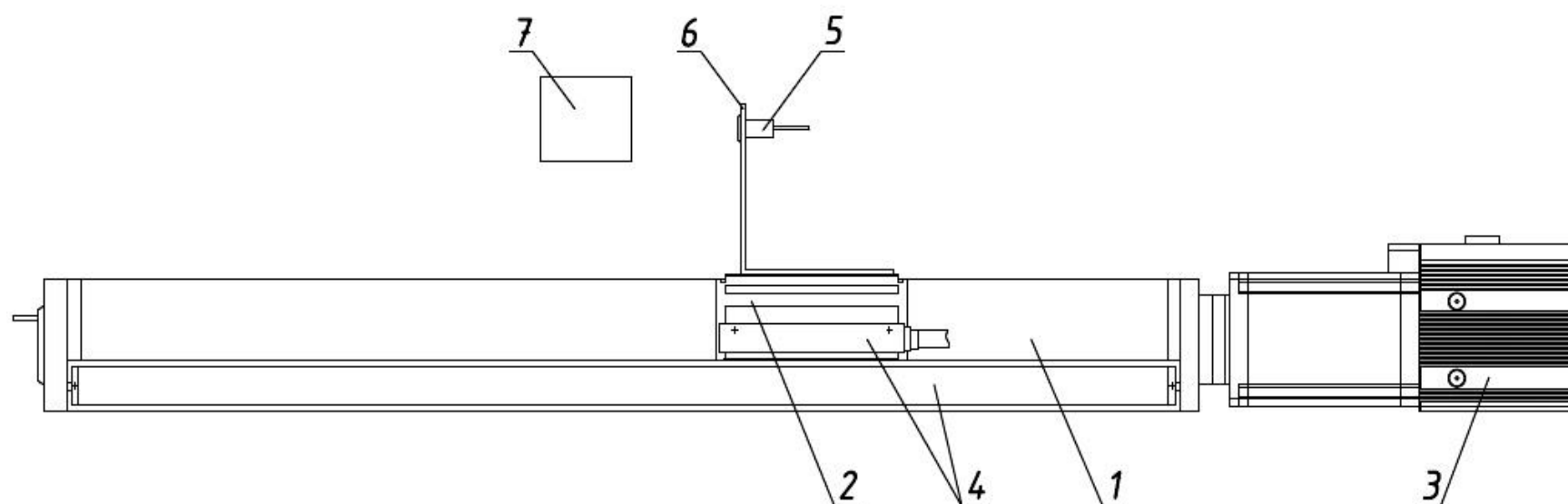
Для получения показаний виброперемещений роторов и зазоров в системах вибродиагностики используются вихретоковые преобразователи. Неопределенность показаний преобразователей, указанная в паспорте, является достоверной только для определенных параметров, при которых проводилась их калибровка на заводе. Характеристика датчиков может меняться в случае изменения параметров, что увеличивает неопределенность показаний. Это связано с изменением характеристик электромагнитного поля вихревых токов, наводимых катушкой в объекте. В статье Ю.П. Батырева подробно описаны и рассмотрены методы уменьшения температурной погрешности вихретоковых датчиков [Батырев и др. 2007], а в четвертой главе диссертации Ю.П. Батырева рассмотрены и некоторые другие источники погрешностей вихретоковых датчиков и определены пути их снижения [Батырев 2006]. Одним из способов избавления от неопределенностей является калибровка вибрационных систем в нестандартных условиях, которая позволяет определять действительные метрологические характеристики средства измерения. По этой причине системы вибродиагностики оснащаются системами калибровки [Батырев 2006; Система технического диагностирования... б/д; Аркадов и др. 2010, с. 246 — 247].

**Краткое описание калибровочной системы**

Калибровка производится путём соотношения эталонной величины, в данном случае — расстояния от датчика до объекта измерения, и показаний датчика.

Для калибровки датчиков используется подход, основанный на выполнении серии измерений, в результате которых формируется набор расстояний от датчика до объекта, и соответствующих им показаний датчика. Датчик устанавливается на каком-либо передвижном модуле, положение которого известно в любой момент времени с заданной точностью. Итогом калибровки является таблица с показаниями датчика и соответствующими им положениями передвижного модуля. По полученным данным, отраженным в таблице, можно получить характеристику датчика для условий, в которых проводилась калибровка и построить на графике соответствующую данной характеристике калибровочную кривую.

Реализованная в данной работе система калибровки представлена на **рис. 1**. Она состоит из модуля линейного перемещения (1) с кареткой (2), перемещающейся по салазкам. Модуль линейного перемещения подключен к шаговому сервоприводу (3). На каретке и модуле линейного перемещения закреплен высокоточный линейный энкодер (4), что позволяет получать показания перемещения каретки и использовать их в качестве известной величины расстояния для калибровки. Калибруемый датчик (5) жестко закреплен с помощью кронштейна (6) на каретке, что определяет его перемещение совместно с кареткой. Показания датчика, содержащие расстояние до объекта измерения (7), передаются на персональный компьютер с установленным аналого-цифровым преобразователем (на рисунке не показан) для регистрации сигнала.



**КАЦЕР Ю.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И ТЭС  
С ПОМОЩЬЮ КАЛИБРОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ**

**Рис. 1.** Схема системы калибровки:

- 1** — модуль линейного перемещения, **2** — каретка, **3** — шаговой сервопривод, **4** — высокоточный линейный энкодер, **5** — калибруемый датчик, **6** — кронштейн, **7** — объект измерения

Управление системой производится с помощью автоматизированного программного обеспечения, созданного в среде разработки LabVIEW.

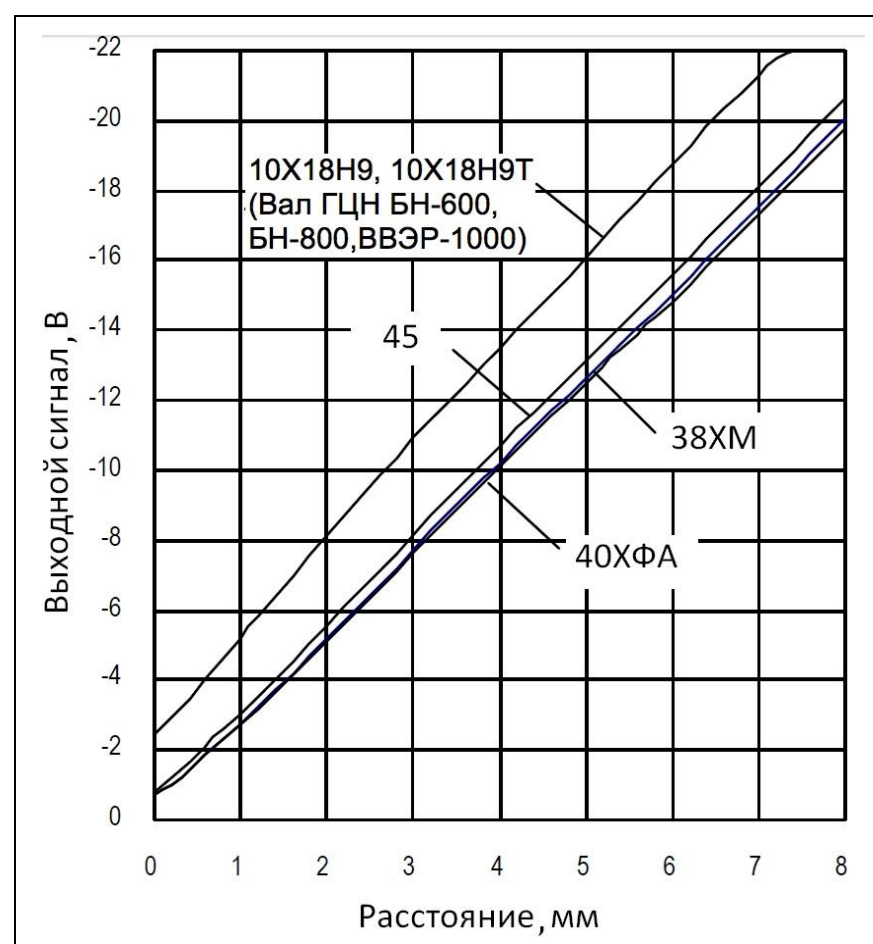
**Результаты экспериментальных калибровок**

С целью подтверждения зависимости показаний датчиков от материала объекта измерения были выбраны следующие стали:

- сталь 10X18H9 (10X18H9T);
- сталь 45;
- сталь 38ХМ;
- сталь 40ХФА.

Выбор обусловлен использованием данных материалов для валов и подшипников ЦН реакторов БН-600, БН-800, ВВЭР-1000. Сравнение в данной работе ведется со сталью 45, так как в отечественных метрологических лабораториях при получении калибровочной характеристики преобразователей в качестве материалов стандартных калибровочных образцов используют конструкционные углеродистые качественные стали, к которым и относится данная сталь.

Как видно из **рис. 2**, угол наклона кривых почти одинаковый, поэтому влияния на показания вибраций будет незначительным, однако одной из функций систем вибродиагностики является вычисление зазора подшипников и ротора в режимах измерения смещения ротора и виброперемещения ротора [*Система технического диагностирования... б/д*].



**Рис. 2.** Характеристики вихретокового датчика для разных материалов.

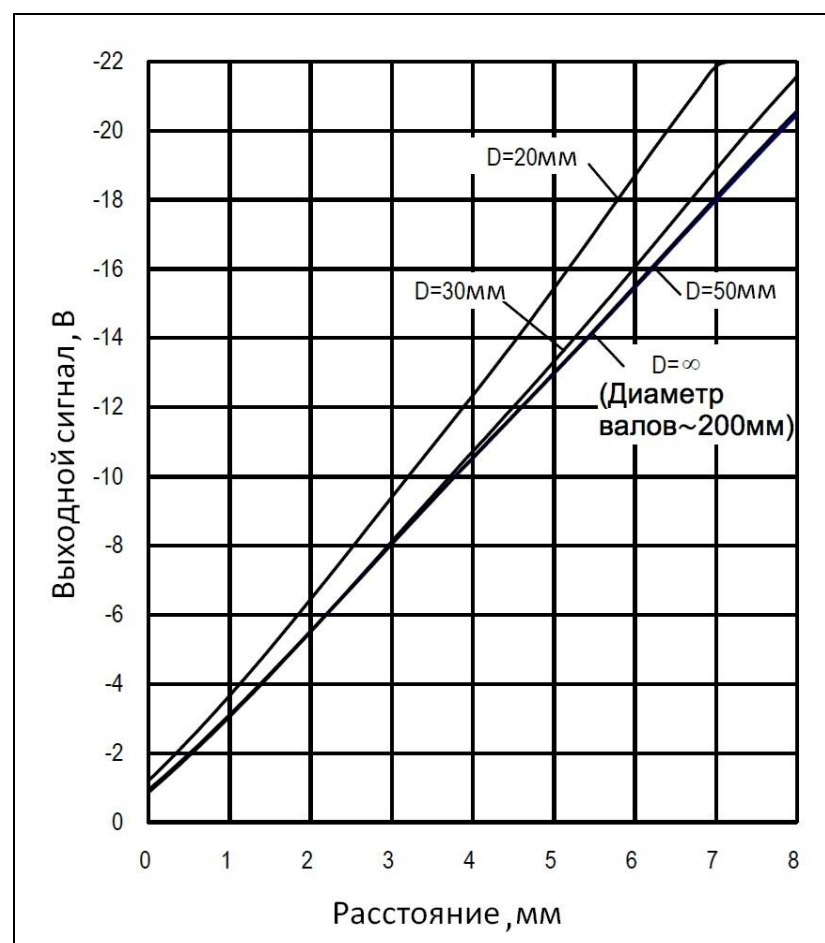
Для этих показаний отклонение, зависящее от смещения калибровочной кривой, уже будет существенным, и имеет смысл учет материала. Смещение кривых объясняется различием электропроводности выбранных материалов, и, как следствие, изменением электромагнитных полей вихревых токов, возникающих в объекте.

Отклонение результатов для разных материалов от результатов для стали 45 таковы:

- сталь 10X18H9 (10X18H9T): 15,1 ... 60,9%;
- сталь 38ХМ: до 3,8%;
- сталь 40ХФА: до 4,8%.

**КАЦЕР Ю.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И ТЭС  
С ПОМОЩЬЮ КАЛИБРОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ**

Также были проведены экспериментальные калибровки с целью определения зависимости показаний вихретоковых датчиков от диаметра заготовки объекта цилиндрической формы при измерениях со стороны цилиндрической поверхности. Выбор данных размеров для эксперимента обусловлен приведенными в работах Б.М. Трояновского и Ф.М. Митенкова диаметрами валов [Трояновский и др. 1985; Митенков и др. 1989], все они превышают значения 200 мм. Результаты приведены на **рис. 3**.



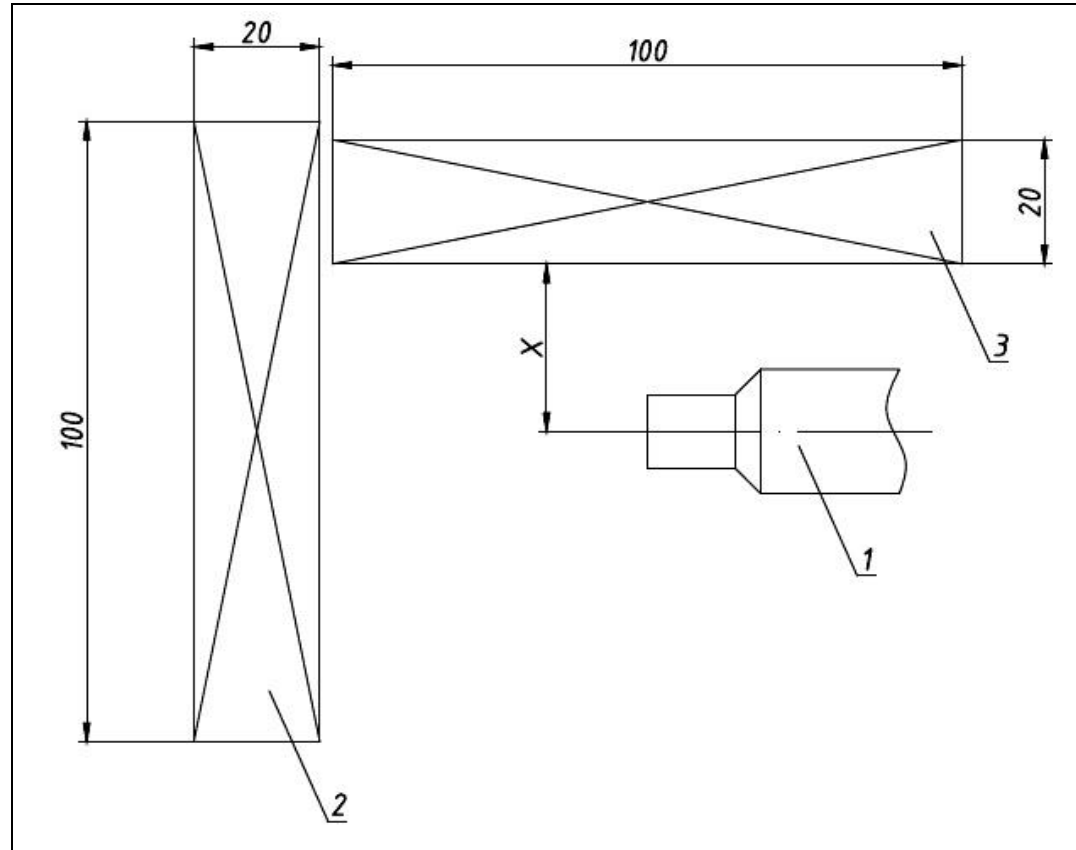
**Рис. 3.** Характеристики вихретокового датчика для цилиндрических объектов разного диаметра.

Диаметр заготовки также влияет на характеристики образующегося электромагнитного поля и, следовательно, на выходное напряжение преобразователя.

Отклонение результатов для диаметра вала 200 мм от диаметра вала 20 мм составило до 17,1%.

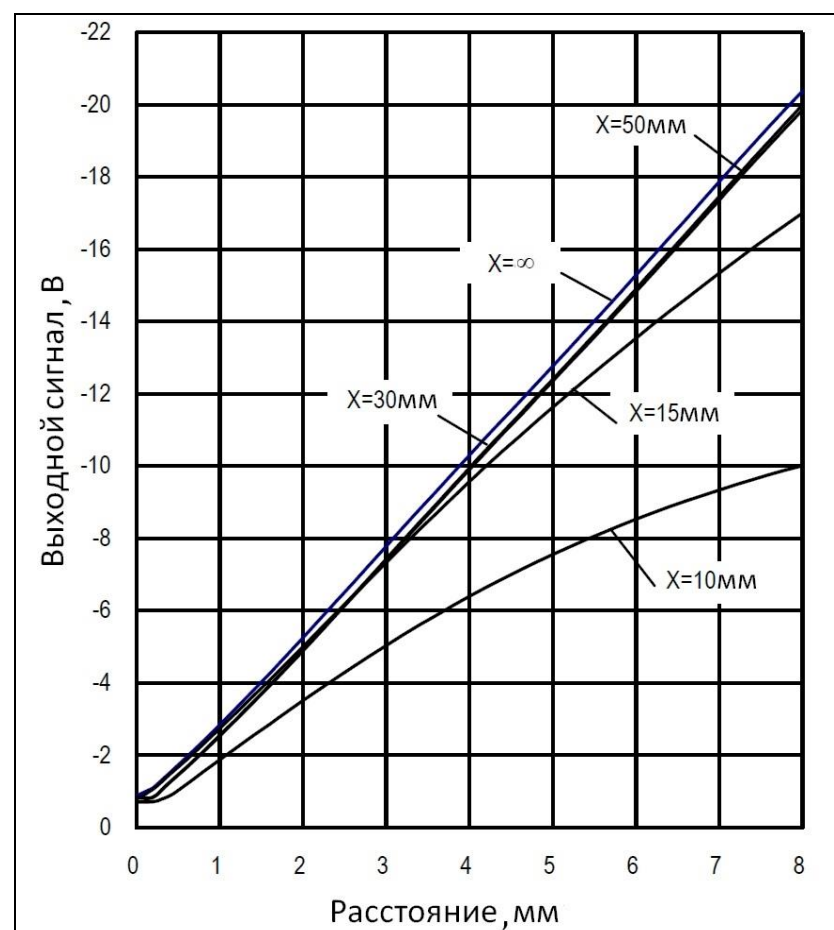
Ввиду сложности конструкции ТУ и ЦН в местах установки датчиков, сбоку от них, могут выступать части конструкции, так называемые боковые преграды. Они также могут оказывать большое влияние на показания датчика. Схема установки датчика для проведения эксперимента показана на **рис. 4**. Датчик (**1**) и объект измерения (**2**) имеют фиксированное положение, а расстояние до боковой преграды (**3**), обозначенное **X**, принимает значения 10, 15, 30, 50 мм.

**КАЦЕР Ю.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И ТЭС  
С ПОМОЩЬЮ КАЛИБРОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ**



**Рис. 4.** Схема установки датчика (вид сверху): **1** — датчик, **2** — объект измерения, **3** — боковая преграда, **X** — расстояние до боковой преграды.

В боковой преграде, как и в объекте измерений, возникают вихревые токи. Электромагнитное поле, возникающее в преграде, влияет на выходной сигнал преобразователя и вносит значительную погрешность в измерения, если преграда находится вблизи объекта (**рис. 5**).



**Рис. 5.** Характеристики вихретоковых датчиков для разных значений расстояния до боковой преграды.

Отклонения результатов от характеристики, полученной при отсутствии преграды:

- 50 мм: до 1,5 %;
- 30 мм: до 1,7 %;
- 15 мм: до 19,5 %;
- 10 мм: до 57,2%.

**Заключение**

**КАЦЕР Ю.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И ТЭС  
С ПОМОЩЬЮ КАЛИБРОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ**

В данной работе проведено исследование зависимости характеристик вихретоковых преобразователей от различных параметров с помощью разработанной калибровочной системы. Проведенные экспериментальные калибровки показывают, что характеристики вихретоковых преобразователей зависят от материалов и размеров объектов измерений, а также от расстояния до боковой преграды. Существуют подобные зависимости и для других параметров, не рассматриваемых в данной работе. Это доказывает необходимость совершенствования вихретоковых преобразователей с целью уменьшить погрешность или полностью исключить влияние различных факторов на показания, что позволит пользоваться при работе стандартными паспортными характеристиками. Этот метод широко используется только в случаях влияния отдельных параметров на показания датчиков [Батырев и др. 2007]. Иначе требуется получение калибровочных характеристик для нестандартных условий эксплуатации путем установки калибровочных комплексов в системах контроля вибрации. Такой подход на сегодняшний день применяется в большинстве систем вибродиагностики, включающих в себя вихретоковые преобразователи: влияние на показания преобразователей в местах работы может оказывать целый ряд факторов.

Использование действительных характеристик датчиков измерения вибраций позволяет обеспечить точность диагностики состояний и, как следствие, минимизировать затраты на эксплуатацию агрегатов и на использование замещающих мощностей. Уменьшение затрат на эксплуатацию агрегатов станет возможным за счет предотвращения аварий и сокращения числа дорогостоящих аварийно-восстановительных ремонтов. Сократить затраты на использование замещающих мощностей для обеспечения тепло-, электроэнергией потребителя можно за счет увеличения времени между остановками. Безошибочная и своевременная диагностика повышает надежность работы оборудования ТЭС, АЭС. Качественная диагностика позволяет выявить небольшие дефекты, которые можно своевременно устранить, тем самым предотвратив серьезные повреждения и остановки. Это также позволит удерживать стоимость вырабатываемой энергии на уровне, установленном в проекте.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Финкель Б.М. Системы диагностирования ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2010. С. 246 – 247.
2. Батырев Ю.П. Разработка и исследование устройств контроля механических параметров вращающихся валов на базе электромагнитных датчиков. Дисс. ... к. т. н. М., 2006. 172 с.
3. Батырев Ю.П., Полуэктов Н.П., Харченко В.Н., Багдатов В.Е. Методы повышения температурной стабильности вихретоковых датчиков // Лесной вестник. 2007. № 2. С. 103 – 108.
4. Лескин С.Т., Слободчук В.И., А.С. Шелегов А.С. Анализ состояния ГЦН ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2016. № 4. С. 16 – 20.
5. Митенков Ф.М., Новинский Э.Г., Будов В.М. Главные циркуляционные насосы АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1989. 376 с.
6. Система технического диагностирования главных циркуляционных насосных агрегатов STD ГЦНА-1391 [Электронный ресурс] // All-Pribors.Ru. Режим доступа: <http://www.all-pribors.ru/opisanie/56440-14-std-gtsna-1391-60256>.
7. Трояновский Б.М., Филиппов Г.А., Булкин А.Е. Паровые и газовые турбины атомных электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1985. 256 с.
8. Хвостиков А.С., Космынин А.В., Щетинин В.С., Рябых И.В. Вибрационная диагностика оборудования ТЭЦ // Современные наукоемкие технологии. 2012. № 9. С. 81 – 82.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11–2011:

Кацер, Ю. Д. Исследование характеристик датчиков контроля вибрации оборудования АЭС и ТЭС с помощью калибровочной системы [Электронный ресурс] / Ю.Д. Кацер // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. — 2017. — Т. 15. — Вып. 1: Studia studiosorum: успехи молодых исследователей. — Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-aprov\_e-ast15-1.2017.31.

КАЦЕР Ю.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И ТЭС  
С ПОМОЩЬЮ КАЛИБРОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ

## FACTORIAL STUDY OF VIBRATION MONITORING SENSORS CHARACTERISTICS FOR NPP AND CHPP EQUIPMENT USING CALIBRATION SYSTEM

Yuriy D. Katser, student at Bauman Moscow State Technical University

**ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0002-5468-4079>

E-mail: yuriy-d-katser@j-spacetime.com; katseryuriy@gmail.com

The eddy current sensors are influenced by various factors, which forces us to investigate the extent of this influence and, if necessary, the ways of its elimination. In my work, I explored the dependence of the indication of eddy current sensors on the dimensions and material of the measurement object, as well as the effect of the presence of a lateral obstacle on the indication of the sensors. I carried out experimental calibrations for each case using calibration system specially designed for this.

The calibration system consisted of linear displacement module with a carriage moving along the sled. The linear motion module was connected to adjustable angle slide. On the carriage and the linear displacement module, a high-precision linear encoder was fixed, which allowed receiving the carriage displacement indications and using them as a known distance for calibration. The calibrated sensor was rigidly fixed with a bracket on the carriage, which determined its movement together with the carriage. The sensor readings containing the distance to the measurement object are transmitted to a PC with an analog-to-digital converter installed for recording the signal. I used this device for examining four types of steel used in the production of bearings and reactors for NPPs and CHPPs.

My experiments confirmed the existence of the dependence of indications of eddy current converters on various factors by means of carried out research. The received indications of the sensors clearly show that there is the significant deviation for different values of the changing parameters. Application of such measuring transducers in vibrodiagnostic systems of NPP and CHPP equipment makes it very important to take into account the errors in the indications and find ways to minimize them. One possible way to find the actual characteristics of eddy current sensors is calibration under non-standard conditions.

I conclude that using sensors actual characteristics makes it possible to improve the quality of diagnostics of equipment, which leads to an increase in the reliability and economic efficiency of NPPs and CHPPs.

**Keywords:** measuring transducer calibration; measurement error; eddy current sensors; measuring system; calibration system; accuracy of measurements.

### References:

1. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. *Diagnostic Systems of Water-moderated Power Reactor*. Moscow: Energoatomizdat Publisher, 2010, pp. 246 – 247. (In Russian).
2. Batyrev Yu. P. *Devices Development and Research for Monitoring Mechanical Parameters of Rotating Shafts Based on Electromagnetic Sensors*. Sc.D. diss. Moscow, 2006. 172 p. (In Russian).
3. Batyrev Yu.P., Poluektov N.P., Kharchenko V.N., Bagdatyev V.E. "Methods for Increasing the Temperature Stability of Eddy Current Sensors." *Forest Bulletin 2* (2007): 103 – 108. (In Russian).
4. Khvostikov A.S., Kosmynin A.V., Shchetinin V.S., Ryabykh I.V. "Vibration Diagnostics of Central Heating and Power Plant Equipment." *Modern High Technologies 9* (2012): 81 – 82. (In Russian).
5. Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S. "In-service State Analysis of Main Circulating Pumps of Water-moderated Power Reactor-1000." *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika [Bulletin of High School, Nuclear Energetics]* 4 (2016): 16 – 20. (In Russian).
6. Mitenkov F. M., Novinskiy E. G., Budov V. M. *The Main Circulating Pumps of Nuclear Power Plants*. Moscow: Energoatomizdat Publisher, 1989. 376 p. (In Russian).
7. "Technical Diagnostics System of Reactor Coolant Pump Set 'GTSNA-1391'." *All-Pribors.Ru* N.p., n.d. Web. <<http://www.all-pribors.ru/opisanie/56440-14-std-gtsna-1391-60256>>. (In Russian).
8. Troyanovsky B.M., Filippov G.A., Bulkin A.E. *Steam and Gas Turbines of Nuclear Power Plants*. Moscow: Energoatomizdat Publisher, 1985. 256 p. (In Russian).

Cite MLA 7:

**КАЦЕР Ю.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС И ТЭС  
С ПОМОЩЬЮ КАЛИБРОВОЧНОЙ СИСТЕМЫ**

Katser, Yu. D. "Factorial Study of Vibration Monitoring Sensors Characteristics for NPP and CHPP Equipment Using Calibration System." *Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time* 15.1 (Studia Studiosorum: Achievements of Young Researchers) (2017). Web. <2227-9490e-aprov\_r\_e-ast15-1.2017.31>. (In Russian).