



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)



УТВЕРЖДАЮ

Ректор

Абдуллазянов Э.Ю.

«20» сентября 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Диссертация «Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов с применением бесконтактных лазерных технологий и фрактального анализа» выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий».

В период подготовки диссертации соискатель Басенко Василий Романович работал в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» в должностях ассистента (с сентября 2019 – по сентябрь 2022) и преподавателя кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (с сентября 2022 – по настоящее время).

В 2019 г. Басенко В.Р. окончил ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» с присуждением степени магистра по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», диплом № 101624 4662326 от 05 июля 2019 года.

С 2019 г. Басенко В.Р. обучается в аспирантуре ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель – Ившин Игорь Владимирович, доктор технических наук, проректор по науке и коммерциализации, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

По итогам обсуждения диссертации «Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода

силовых трансформаторов с применением бесконтактных лазерных технологий и фрактального анализа» принято следующее заключение.

1. Актуальность

Силовой трансформатор является одним из основных элементов электрооборудования энергосистем, поэтому даже незначительный процент отказа трансформаторов приводит к нарушениям электроснабжения и большому экономическому ущербу в энергосистеме и у потребителей. Поддержание необходимой степени работоспособного состояния силового оборудования в процессе его эксплуатации обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта. А оценка технического состояния обеспечивается системой контроля технического состояния, мониторинга и диагностики. Эта система должна включать современные высокоточные, чувствительные методы и приборы контроля и диагностики.

Одними из наиболее важных параметров при контроле технического состояния трансформатора является состояние прессовки его обмоток и магнитопровода. С физической точки зрения вибрация трансформатора качественно и количественно коррелируется с состоянием прессовки обмоток и магнитопровода.

Ослабление прессовки обмоток и магнитопровода может привести к необратимому взаимному смещению отдельных витков и даже слоев обмотки, либо пластин магнитопровода. Итогом таких изменений может явиться снижение изоляционной прочности и выход трансформатора из строя. Определение качества прессовки обмоток и магнитопровода может быть выполнено на основании анализа вибрационных сигналов работающего трансформатора. Для оценки технического состояния прессовки обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов возможно применение методов вибрационного контроля.

2. Научная новизна результатов работы

1. Разработана уникальная математическая модель обмоток и магнитопровода силового трансформатора, которая основана на моделировании мультифизического процесса колебаний обмоток и магнитопровода под действием магнитострикционного эффекта. Разработанная модель позволяет определять информативные параметры вынужденных колебаний обмоток и магнитопровода силового трансформатора, установить влияние степени прессовки магнитопровода и обмоток трансформатора на характеристики вибрации.

2. Впервые применен метод фрактального анализа для определения степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

3. Разработан новый усовершенствованный метод вибрационного контроля, основанный на фрактальном анализе амплитудно-временной характеристики вибрационного сигнала.

4. Разработаны новые алгоритм и программное обеспечение для реализации усовершенствованного метода вибрационного контроля

технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

3. Научная и практическая значимость результатов

Теоретическая значимость работы заключается в проведении математического моделирования вынужденных колебаний обмоток и магнитопровода силового трансформатора под воздействием электромагнитного поля в программном обеспечении COMSOL, установлена зависимость изменения фрактальной размерности вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода трансформатора от степени их прессовки.

Практическая значимость работы заключается в разработке усовершенствованного метода вибрационного контроля с возможностью дистанционного, бесконтактного измерения вибрации, определения степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора с применением фрактального анализа. Данный метод позволяет проводить контроль технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов различного класса напряжений, с различной изоляционной средой, без отключения трансформатора от сети.

Разработан и изготовлен бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс, позволяющий реализовать усовершенствованный метод вибрационного контроля на основе фрактального анализа амплитудно-временной характеристики вынужденных колебаний.

4. Личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации

Соискатель непосредственно участвовал в получении результатов, которые отражены в статьях и диссертации. Автор принимал участие в работе над разработкой математической модели обмоток и магнитопровода силового трансформатора, занимался проверкой достоверности результатов моделирования, созданием новых алгоритмов и метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

Автор принимал участие в создании и разработке программного обеспечения для реализации фрактального анализа вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода силового трансформатора и проведении экспериментальных исследований под руководством научного руководителя Ившина И.В.

5. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность и обоснованность теоретических результатов и выводов диссертации подтверждается применением общепринятых методов для расчетов параметров колебаний конструкций. Теоретические результаты согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Достоверность новых экспериментальных данных, полученных при исследовании дефектных и бездефектных изделий, обеспечивается применением

аттестованных измерительных средств и апробированных экспериментальных методик, а также воспроизводимостью результатов измерений.

6. Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» по пунктам паспорта 1 – «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»; 3 – «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды.»; 6 – «Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии».

7. Полнота изложения результатов диссертации в работах, опубликованных автором

По результатам выполненных исследований опубликовано 18 научных работ, из них 1 статья в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной базе данных SCOPUS, 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 11 материалов докладов на всероссийских научных конференции, в их числе 10 публикаций, включенных в РИНЦ.

Статья в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной базе данных SCOPUS

1. Basenko V., Vladimirov O., Ivshin I., Nizamiev M., Usmanov I. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. V. 190. P. 157-167. (статья в рецензируемом научном издании МБД SCOPUS, вклад соискателя – 30%).

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации

2. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора // Известия высших учебных заведений. Проблемы

энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 140-153. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-140-153 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2, вклад соискателя – 30%).

3. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 3. С. 130-143. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2, вклад соискателя – 60%).

4. Низамиев М.Ф., Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В. Диагностика трансформаторов электротехнических комплексов с использованием бесконтактных лазерных виброметров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022 Т. 24. № 5. С. 97-109. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-5-97-109 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2, вклад соискателя – 40%).

5. Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф. Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния магнитопровода силового трансформатора, основанный на фрактальном анализе амплитудно-временной характеристики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т.25. № 2. С. 124-136. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-124-136 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2, вклад соискателя – 40%).

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680434. Определение фрактальной размерности вибрационного сигнала силового трансформатора. / Ившин И.В., Басенко В.Р., Галяутдинова А.Р. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01.11.2022 (вклад соискателя – 60%).

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682581. Определение уровня технического состояния магнитопровода силового трансформатора. / Ившин И.В., Басенко В.Р., Галяутдинова А.Р. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.11.2022 (вклад соискателя – 60%).

Публикации в изданиях, включенных в РИНЦ

8. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Контроль технического состояния трансформаторного оборудования // Электроэнергетика. Энергия-2019. Материалы всероссийской конференции: в 7 томах. Том 3. 2019 г. Иваново: ИГЭУ, 2019. С. 91 (вклад соискателя – 50%).

9. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса // Электроэнергетика: Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6-ти

томах, Иваново, 07–10 апреля 2020 года. Том 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. – С. 26 (вклад соискателя – 50%).

10. Галиев Р.Р., Басенко В.Р. Измерительно-диагностический комплекс для бесконтактного контроля технического состояния трансформаторного оборудования // Тинчуринские чтения : Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 23–26 апреля 2019 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 1. Часть 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 182-187. (вклад соискателя – 30%).

11. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Контроль вибрационных характеристик силового трансформатора с использованием дистанционных лазерных технологий // Тинчуринские чтения - 2020 "Энергетика и цифровая трансформация" : Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 28–29 апреля 2020 года. Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 149-152. (вклад соискателя – 80%).

12. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И. В. Анализ вибрационных параметров трансформатора ТМН 6300 35/6 кВ с помощью контрольно-измерительного комплекса на основе лазерного виброметра // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: Материалы VI Национальной научно-практической конференции. В двух томах, Казань, 10–11 декабря 2020 года. Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 393-396. (вклад соискателя – 70%).

13. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. Измерение параметров вибрации силового трансформатора электрической подстанции узла кустовой насосной станции с помощью контрольно-измерительного комплекса на основе лазерного виброметра // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли : Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, Альметьевск, 12 ноября 2020 года. Том 2. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2020. – С. 55-59. (вклад соискателя – 60%).

14. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня опрессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация» : Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3 томах, Казань, 28–30 апреля 2021 года. Том 1. – Казань: ООО ПК «Астор и Я», 2021. – С. 82-86. (вклад соискателя – 60%).

15. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В. Определение информативного частотного диапазона механических колебаний силового трансформатора с помощью метода конечных элементов // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: Материалы VII Национальной научно-

практической конференции, Казань, 09–10 декабря 2021 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 630-632. (вклад соискателя – 50%).

16. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Определение вибрационных характеристик магнитопровода силового трансформатора с применением бесконтактного лазерного контрольно - измерительного комплекса // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых) : Международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, 10–11 ноября 2021 года. Том III. – Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021. – С. 280-283. (вклад соискателя – 40%).

17. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Контроль технического состояния магнитопровода трансформатора с использованием бесконтактного лазерного контрольно-измерительного комплекса // Тинчуринские чтения - 2022 «Энергетика и цифровая трансформация»: Сборник статей по материалам конференции. В 3-х томах , Казань, 27–29 апреля 2022 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова . Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 173-175. (вклад соискателя – 80%).

Публикации в материалах докладов международных и всероссийских научных конференций

A18. Басенко В.Р. Методы диагностики силовых трансформаторов / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. // XXIII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика. Казань: КГЭУ, 2019. С. 113-115 (вклад соискателя – 60%).

В перечисленных работах Басенко Василием Романовичем лично получены следующие результаты:

[1, 2, 10, 14] – разработка и описание лазерного контрольно-измерительного комплекса;

[4, 8, 9, 11, 12, 13, 17] – обработка данных и анализ полученных результатов после проведения экспериментов;

[3] – разработка математической модели силового трансформатора;

[5, 18] – разработка метода вибрационного контроля магнитопровода силового трансформатора;

[15, 16] – определение информативного диапазона вибрационного сигнала магнитопровода силового трансформатора.

Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора: по главе 1 – в [2, 7, 17, 18], по главе 2 – в [4, 12, 14], по главе 3 – в [1, 2, 9, 13, 15, 16], по главе 4 – в [3, 8, 10, 11].

В диссертационной работе не выявлено использования материалов или отдельных результатов без ссылок на автора или источник заимствования, включая работы, выполненных соискателем лично и/или в соавторстве.

8. Апробация работы

Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- международная научно-практическая конференция «Электроизоляционные материалы: производство, эксплуатация, контроль, импортозамещение», 2023 г., Казань, КГЭУ;

- международные молодежные научные конференции «Тинчуринские чтения», 2019-2022 гг., Казань, КГЭУ;

- международные научно-технические конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия», 2019-2021 гг., Иваново, ИГЭУ;

- национальные научно-практические конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», 2020-2021 гг., г. Казань, КГЭУ;

- международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, 2022 г., г. Казань, КНИТУ-КАИ;

- международная научно-практическая конференция «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли», 2020 г., г. Альметьевск, АГНИ.

9. Ценность научных работ соискателя

В опубликованных автором работах содержатся следующие научные результаты:

1. Проведен анализ существующих методов, способов и систем вибрационного контроля технического состояния силовых трансформаторов, а также методов обработки и анализа вибросигналов работающих технических систем.

2. Разработана математическая модель обмоток и магнитопровода силового трансформатора, проведены исследования по определению информативных характеристик вибрационного сигнала, установлена их связь с количественными значениями степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора, диапазон измерения и чувствительность к изменению работоспособного состояния, возможность использования фрактального анализа вибрационного сигнала для оценки степени прессовки.

3. Разработан усовершенствованный метод вибрационного контроля, отличающийся от существующих методов возможностью дистанционного, бесконтактного измерения характеристик вибрации трансформатора и

большой чувствительностью к определению степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора за счет применения фрактального анализа амплитудно-временных характеристик измеренных вынужденных колебаний.

4. Разработаны алгоритм и программное обеспечение для реализации усовершенствованного метода вибрационного контроля. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение позволяют осуществлять запись сигнала, преобразование, обработку, анализ результатов вибрационных измерений. Алгоритмы анализа результатов измерений построены на основе определения фрактальной размерности, расчете интегрального показателя, а именно коэффициента фрактального анализа. На основе рассчитанного коэффициента определяется степень прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора, путем сравнения полученного коэффициента с установленными граничными значениями.

5. Разработан и создан бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс, позволяющий обеспечить реализацию усовершенствованного метода вибрационного контроля. Разработанный бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс позволяет без предварительной подготовки поверхности трансформатора проводить измерения, что дает возможность определять техническое состояние силового трансформатора без вывода его из эксплуатации.

6. Проведены экспериментальные исследования на действующих силовых трансформаторах для практической реализации усовершенствованного метода вибрационного контроля по определению степени прессовки обмоток и магнитопроводов по параметрам вибрации и сравнительный анализ разработанного и существующего способа обработки вибрационных сигналов.

10. Характер результатов

Характер результатов диссертации соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства образования и науки РФ.

11. Выводы

Диссертация Басенко В.Р. «Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов с применением бесконтактных лазерных технологий и фрактального анализа» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение задачи совершенствования существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора, способствующего повышению надёжности изделий.

Решение данной задачи имеет значение для развития области науки и техники, занимающейся созданием научных основ методов аналитического и неразрушающего контроля и диагностики изделий, разработкой и

внедрением приборов, средств и систем аналитического и неразрушающего контроля и диагностики изделий с улучшенными характеристиками.

Диссертация обобщает самостоятельные исследования автора, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, свидетельствует о личном вкладе автора в науку. При выполнении диссертационной работы Басенко В.Р. проявил себя зрелым научным работником, способным ставить и решать сложные теоретические и практические задачи.

Работа соответствует критериям п. 9 – 14 Положения о присуждении ученых степеней Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертация «Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов с применением бесконтактных лазерных технологий и фрактального анализа» Басенко Василия Романовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».

Заключение принято на заседании кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Присутствовало на заседании 25 чел. Результаты голосования: «за» – 25 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 4 от «20» сентября 2023 г.



Сафин Альфред Робертович,
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Электроснабжение промышленных
предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»,
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.
Тел. (843)519-42-73, e-mail: epp.kgeu@mail.ru

Сведения о лице, утвердившем заключение:

Абдуллазянов Эдвард Юнусович: кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», ректор,
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.
Тел. (843)519-42-02, e-mail: rector@kgeu.ru