

# МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.315

DOI:10.30724/1998-9903-2026-28-1-3-21

## МЕТОД БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛЭП 6-10 кВ И ИСТОЧНИКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ

Брамм А.М., Хальясмаа А.И., Матренин П.В., Ерошенко С.А.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия  
am.bramm@urfu.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Рост доли нелинейных нагрузок и силовой электроники в распределительных сетях 6-10 кВ вызывает увеличение уровня гармонических и интергармонических искажений, что приводит к нарушению синусоидальности напряжения и ускоренному старению оборудования. При этом традиционные контактные методы измерения параметров качества электроэнергии (ПКЭ) ограничены эксплуатационными условиями и требуют сложной организации измерений. **ЦЕЛЬ.** Разработать алгоритм контроля источников искажений в сетях 6-10 кВ на основе сигналов бесконтактных индуктивных и емкостных датчиков электромагнитного поля. **МЕТОДЫ.** Для выделения гармонических и интергармонических составляющих использованы методы спектрального анализа (БПФ и КВПФ), а также метод формирования «спектральных подписей», включающий информативные признаки: изменение амплитуды и фазы основной гармоники (50 Гц), коэффициента ТНД, а также суммарных амплитуд четных и нечетных гармоник. Эксперименты выполнены на лабораторной установке, имитирующей участок ЛЭП 6-10 кВ. Исследованы режимы работы с нагрузкой в виде асинхронного двигателя, диодного моста и однофазной нелинейной нагрузки. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Показано, что индуктивные датчики чувствительны к изменению токовых нагрузок и динамике магнитного потока, в то время как емкостные сенсоры фиксируют искажения электрического поля и асимметрию фаз. Для асинхронного двигателя наблюдалось снижение ТНД до -12% и рост амплитуды основной гармоники до 65%. Для диодного моста характерен рост высокочастотных четных гармоник до +1550%, а для однофазной нелинейной нагрузки – появление фазной несимметрии и увеличение ТНД на 2-4%. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показано, что совмещенное использование индуктивных и емкостных бесконтактных датчиков формирует отличающиеся спектральные подписи для трех рассмотренных типов источников искажений. Разработанный алгоритм позволяет формализовать процедуру формирования эталонной библиотеки «источник–спектр» и может служить основой для построения интеллектуальных систем бесконтактного контроля качества электроэнергии в распределительных сетях 6-10 кВ.

**Ключевые слова:** *параметры качества электроэнергии; гармонические искажения; бесконтактные датчики; электромагнитное поле; КВПФ; БПФ; ЛЭП 6-10 кВ.*

**Для цитирования:** Брамм А.М., Хальясмаа А.И., Матренин П.В., Ерошенко С.А. Метод бесконтактного контроля параметров электромагнитного поля ЛЭП 6-10 кВ и источников гармонических искажений, основанный на спектральном анализе данных // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 3-21. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-3-21.

**METHOD FOR NON-CONTACT CONTROL OF ELECTROMAGNETIC FIELD  
PARAMETERS OF 6-10 kV OVERHEAD TRANSMISSION LINE AND HARMONIC  
DISTORTION SOURCES BASED ON SPECTRAL DATA ANALYSIS**

**Bramm A.M., Khalyasmaa A.I., Matrenin P.V., Eroshenko S.A.**

**Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,  
Yekaterinburg, Russia  
am.bramm@urfu.ru**

**Abstract:** *RELEVANCE* of the study lies in the increasing number of nonlinear loads and power electronic devices in 6-10 kV distribution networks is causing an increase in harmonic and interharmonic distortion. This distortion is disrupting the sinusoidal nature of the voltage and accelerating equipment aging. Traditional contact-based methods for measuring power quality parameters are limited by their operating conditions and require complex measurement setups. *OBJECTIVE* of this study aims to develop an algorithm for identifying distortion sources in 6-10 kV networks by analyzing signals from non-contact electromagnetic field sensors that measure inductive and capacitive fields. *METHODS* of the study include spectral analysis techniques, such as Fast Fourier Transform (FFT) and Short-Time Fourier Transform (STFT), to extract harmonic and interharmonic components from the data. These techniques form spectral fingerprints, which include informative features like the variation in amplitude and phase of the fundamental harmonic (50 Hz), total harmonic distortion (THD), and the sum of even and odd harmonic amplitudes. Laboratory experiments were conducted on a 6-10 kV distribution line segment, simulating different operating modes with asynchronous motors, three-phase diodes, and single-phase non-linear loads. *THE RESULTS.* show that inductive sensors are sensitive to changes in current load and magnetic flux, while capacitive sensors can detect electric field distortions and phase asymmetries. For the asynchronous motor, the total harmonic distortion (THD) decreased by up to 12% and the amplitude of the main harmonic increased by 65%. High-frequency even harmonics were generated by the diode bridge with an amplitude growth of up to +1550%. Single-phase nonlinear loads introduced phase asymmetry and increased the THD by 2-4%. *CONCLUSION* states that combination of inductive and capacitive non-contact sensors allows for distinct spectral signatures which can be used as features for further identification algorithms of distortion sources. The developed algorithm can form a reference spectrum library and serve as a basis for intelligent non-contact monitoring systems for power quality control in distribution networks of 6-10 kV

**Keywords:** *power quality; harmonic distortion; non-contact sensors; electromagnetic field; spectral analysis; FFT; STFT; distribution networks 6-10 kV.*

**For citation:** Bramm A.M., Khalyasmaa A.I., Matrenin P.V., Eroshenko S.A. Method for non-contact control of electromagnetic field parameters of 6-10 kV overhead transmission line and harmonic distortion sources based on spectral data analysis. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 3-21. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-3-21.

**Введение (Introduction)**

Современные распределительные электрические сети 6-10 кВ характеризуются высоким уровнем подключенной в качестве электрической нагрузки силовой электроники, что приводит к усложнению спектрального состава токов и напряжений. Нелинейные элементы – преобразователи частоты, импульсные источники питания и сварочные установки – создают гармонические и интергармонические искажения, нарушающие синусоидальность напряжения и увеличивающие электромагнитные нагрузки на оборудование. Согласно исследованиям Arranz-Gimon A. и соавт. [1], суммарное гармоническое искажение (THD) в современных сетях распределения может достигать

5-8% при преобладании 5-й и 7-й гармоник, что приводит к росту потерь в трансформаторах и снижению ресурса изоляции. Кроме того, при совпадении ряда условий может наблюдаться резонанс высших гармоник, приводящий к более значительному искажению [2].

Проблема усугубляется тенденцией к увеличению доли генераторов на основе возобновляемых источников. Каур J. и Bath S. [3] показали, что преобразователи

инверторного типа, применяемые в системах с солнечными и ветряными установками, формируют специфические спектры искажений, содержащие комбинации субгармоник. Эти компоненты оказывают влияние на устойчивость и управляемость распределительных сетей, что требует уточнения нормативных методов их измерения и оценки.

Традиционно контроль параметров электромагнитного поля линий электропередачи (ЛЭП) выполняется контактными методами [4-5], либо при помощи дистанционного тепловизионного контроля [6-7]. Однако наиболее частой причиной аварийности ЛЭП 6-10 кВ являются замыкания на землю одной или нескольких фаз [8-9]. Для контроля возникновения таких событий могут быть использованы данные об искажениях параметров качества электроэнергии.

Контроль параметров качества электроэнергии осуществляется при помощи измерений токов и напряжений с использованием контактных датчиков и измерительных трансформаторов. Однако такой подход не всегда возможен в действующих установках. Основными ограничениями для эффективного применения контактных методов контроля выступают: эксплуатационные и пространственно-конструктивные ограничения; сложности с масштабируемостью и охватом сетей.

Эксплуатационные ограничения выражены в необходимости снятия напряжения с токоведущих частей (проводов ЛЭП или измерительных цепей ТП) для подключения контактных датчиков и измерительных приборов. Конструктивные ограничения заключаются в отсутствии внутри большинства ТП необходимого пространства и возможности подключения питания для размещения измерительных приборов для регистрации ПКЭ. Проблемы масштабируемости и охвата выражаются в том, что для локализации источников искажений ПКЭ необходимо организовать множество точек измерения (равномерно покрывающих участок распределительной сети). При использовании регистраторов ПКЭ или контактных датчиков покрытие участка сети с необходимой плотностью потребует колоссальных временных, трудовых и финансовых затрат.

Таким образом, вопросы измерения и идентификации источников гармонических искажений сохраняют актуальность как с точки зрения метрологического обеспечения, так и в аспекте внедрения цифровых технологий контроля. Существующие методы регистрации параметров тока и напряжения не обеспечивают требуемую точность при мониторинге сетей 6-10 кВ в условиях действия помех и изменчивых нагрузок.

Цель исследования заключается в разработке алгоритма и методики диагностики источников искажений на основе анализа сигналов, регистрируемых бесконтактными датчиками электромагнитного поля.

Научная значимость исследования состоит в развитии подходов к спектральному анализу сигналов бесконтактных датчиков электромагнитного поля в распределительных сетях 6-10 кВ и в формализации набора спектральных признаков для последующей автоматизированной идентификации источников искажений.

Практическая значимость исследования заключается в возможности построения автономных интеллектуальных систем бесконтактного контроля параметров качества электроэнергии на основе предложенного алгоритма и набора спектральных признаков.

Ожидается, что предложенный подход обеспечит идентификацию источников возмущений с точностью не ниже 80% и станет основой для построения аппаратно-программного комплекса мониторинга качества электроэнергии в распределительных сетях 6-10 кВ.

#### *Литературный обзор (Literature Review)*

Качество электрической энергии в распределительных сетях 6-10 кВ определяется совокупностью факторов, включая параметры питающего напряжения, характер нагрузки и наличие нелинейных элементов. Гармонические искажения вызывают дополнительные потери, нагрев трансформаторов, ускоренное старение изоляции и сбои в работе электроники. Проблема их контроля подробно рассмотрена в Handbook of Power Quality под редакцией A. Baghini<sup>1</sup>, где обоснована необходимость оценки гармонического состава напряжения и тока в точках общего присоединения (РСС).

Среди работ по этой теме выделяется обзор Ali Z. M., Calasan M., Jurado F. и Abdel Aleem S. H. E. [10], в котором детализированы физические механизмы возникновения гармоник, методы компенсации реактивной мощности и подходы к анализу

---

<sup>1</sup>Baghini A. (ed.) Handbook of Power Quality. – Chichester: John Wiley & Sons, 2013. – 642 p. – ISBN 9781119969480. – URL: <https://www.academia.edu/> (дата обращения: 10.10.25).

несимметричных токов. Авторы подчеркнули, что гармонические составляющие существенно влияют на режимы работы сетей среднего напряжения и требуют системного регулирования.

В монографии Power System Harmonics J. Arrillaga и N. R. Watson [11] приведены математические модели генерации гармоник силовыми преобразователями и методики их учета при проектировании фильтров. Авторы предложили применять разложение Фурье с оконными функциями для анализа токов в цепях с насыщением трансформаторов и асимметрией фаз.

Российская нормативная база основывается на стандарте ГОСТ 32144-2013<sup>2</sup>, который устанавливает предельные значения индивидуальных гармоник и коэффициента суммарного гармонического искажения напряжения ( $THD \leq 8\%$ ). Документ определяет допустимые уровни гармоник по номерам и напряжениям, а также порядок контроля на стороне потребителя. ГОСТ 32144–2013 является базовым документом для электроэнергетических компаний при оценке соответствия качества электроэнергии требованиям технических регламентов.

В международной практике применяются несколько ключевых документов.

Руководство IEC/TR 61000-3-6:2008<sup>3</sup> регламентирует распределение допустимых эмиссий гармоник между присоединенными установками на средних и высоких напряжениях. Стандарт вводит понятие «планового уровня напряжения» в точке общего присоединения и задает процедуру расчета лимитов по напряжению и току в зависимости от мощности установки.

В документе IEEE Std 519-2014<sup>4</sup> приведены рекомендации по ограничению гармонических искажений на стороне как нагрузки, так и источника. Стандарт устанавливает граничные значения THD для напряжения (не более 5% в сетях 1-69 кВ) и для тока ( $TDD \leq 8\%$  при коэффициенте короткого замыкания менее 20). Этот подход ориентирован на предотвращение перегрузки генераторов и кабельных линий.

Европейский стандарт EN 50160:2010<sup>5</sup> определяет параметры качества напряжения, обеспечиваемые в распределительных сетях общего пользования. В документе закреплены допустимые отклонения частоты, формы волны, уровня напряжения и мгновенных колебаний, включая ограничение 6% и 5% для 5-й и 7-й гармоник соответственно.

Методы практического контроля гармоник в электроэнергетике детально проанализированы Al-Feilat E. a. A., El-Amin I. и Bettayeb M. [12]. В их сравнительном исследовании показано, что традиционные измерения, основанные на трансформаторах тока и напряжения, обеспечивают высокую точность, но чувствительны к насыщению магнитопроводов и шумам на частотах выше 2 кГц.

В области бесконтактных технологий Chen K. L., Hu W. J. и Xu W. [13] разработали датчик для воздушных линий, использующий комбинированный принцип регистрации электрического и магнитного полей. Испытания подтвердили возможность получения напряжения с погрешностью менее 3% без прямого подключения к фазному проводнику.

Sun S. и соавт. [14] представили метод измерения напряжения по инверсии ближнего электрического поля, позволяющий оценивать распределение потенциалов вокруг линии электропередачи. Работа продемонстрировала устойчивость метода к внешним помехам и его пригодность для мониторинга сетей среднего класса напряжения.

В исследовании Zhang W. и соавт. [15] описан многоэлектродный датчик, обеспечивающий пространственное разрешение измерений электрического поля и формирование многомерных спектров. Реализованный алгоритм обработки позволил разделять вклад отдельных фаз и источников искажений.

Работа Testa A. И соавт. [16] содержит обоснование методов моделирования интергармоник, возникающих вследствие работы преобразователей. Разработанная ими

---

<sup>2</sup>ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

<sup>3</sup>IEC/TR 61000-3-6:2008. Electromagnetic compatibility (EMC) – Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems. – IEC, 2008.

<sup>4</sup>IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – IEEE, 2014.

<sup>5</sup>EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. – CENELEC, 2010.

процедура идентификации частотных составляющих позволила повысить точность выделения подгармоник в диапазоне 40-48 Гц.

Barros J., Diego R. I. и de Apraiz M. [17] применили вейвлет-преобразование для обнаружения кратковременных отклонений напряжения. Метод продемонстрировал возможность локализации событий во времени и частоте, что делает его эффективным для анализа динамических возмущений.

Dash P. K., Pradhan A. K. и Panda G. [18] исследовали использование S-преобразования для анализа мгновенных характеристик качества электроэнергии. Полученные результаты показали, что этот подход обеспечивает высокую устойчивость к шумам и подходит для автоматизированной классификации событий.

Современная практика мониторинга качества электроэнергии показывает, что для сетей 6-10 кВ необходимо объединение нормативных требований (ГОСТ 32144–2013, IEC 61000-3-6, IEEE 519, EN 50160) с внедрением бесконтактных методов измерения и усовершенствованных алгоритмов спектрального анализа. Это обеспечивает повышение достоверности диагностики и согласованность результатов измерений между различными приборами и системами мониторинга.

Объектом данного исследования являются распределительные электрические сети 6-10 кВ, в которых электромагнитные процессы определяются совокупностью гармонических и интергармонических составляющих токов и напряжений. Эти составляющие возникают вследствие работы нелинейных нагрузок и устройств силовой электроники, что приводит к искажению формы сигнала и усложнению диагностики режимов работы сети.

Регистрация таких искажений традиционно выполняется контактными средствами – трансформаторами тока и напряжения. Однако, как показано в исследованиях Schirmer P. A. and Mrogas I. и соавт. [19], более эффективным решением являются бесконтактные датчики электромагнитного поля. Авторы продемонстрировали, что использование магнитных и электрических антенн позволяет фиксировать распределение тока и напряжения в линии без непосредственного подключения к проводнику. Этот подход обеспечивает непрерывный контроль состояния сети с минимальным вмешательством в силовую часть.

Одним из ключевых элементов системы бесконтактного мониторинга являются индуктивные датчики. Sandler R., Brehm M., Slomovitz D. и Barreto G. [20] предложили конструкцию измерительной катушки типа Роговского, оптимизированной для регистрации гармонических токов высокого напряжения. В работе приведены параметры проектирования магнитопровода, число витков и методы компенсации фазового сдвига, что делает возможным точное измерение токов до 5 кГц.

Для измерения напряжения без подключения к токоведущим частям используются емкостные датчики. Коллектив авторов Peng H., Liu H., Shang K., Li G., Zhao L и соавт. [21] разработали емкостный датчик с несколькими электродами, предназначенный для установки на проводах распределительных линий. Экспериментальные результаты показали, что измеряемое напряжение пропорционально скорости изменения потенциала, а фазовая коррекция может быть обеспечена программной интеграцией сигнала.

Исследование Kuphalan T.S. и соавт. [22] подтверждает эффективность магнитных датчиков для регистрации токов в кабельных линиях. Авторы применили высокочастотные катушки с ферритовым сердечником, что позволило снизить влияние шумов и повысить чувствительность устройства. Такие катушки можно использовать в составе мобильных систем диагностики и лабораторных установок.

Методы измерения распределения электрического поля развиты в работе Roman H. и соавт. [23], где описан емкостный делитель напряжения для бесконтактных измерений на высоковольтных линиях. Авторы показали, что корректный выбор геометрии электродов и расстояния между ними обеспечивает линейную зависимость измеряемого тока от напряженности поля в диапазоне до 10 кВ/м.

В исследовании Nan Z. и соавт. [24] представлена конструкция многоэлектродного емкостного датчика, предназначенного для измерений в сильных электрических полях. Устройство позволяет одновременно регистрировать распределение потенциалов вдоль изолятора, что важно для диагностики состояния высоковольтных вводов и шинных разъемов.

Для спектрального анализа сигналов измерительных каналов используется быстрое

преобразование Фурье (БПФ). В стандарте IEC 61000-4-7:2008<sup>6</sup> приведена методика усреднения спектров и определения гармоник в окне длительностью 200 мс. Документ определяет алгоритмы дискретизации, вычисления амплитудных и фазовых характеристик, а также правила округления значений THD.

В качестве альтернативы БПФ применяются методы с временной локализацией. Stockwell R.G., Mansinha L. и Lowe R.P. [25] предложили S-преобразование, позволяющее совместно анализировать временную и частотную структуру сигнала. Этот метод используется при анализе интергармоник, кратковременных перенапряжений и переходных процессов в распределительных сетях.

Практическое применение вейвлет-преобразования для задач диагностики показано Yan R. и Gao R.X. [26]. Авторы использовали энергию отдельных вейвлет-компонент в качестве диагностических признаков для оценки качества электроэнергии. Такой метод обеспечивает повышенную чувствительность к слабым гармоникам и устойчивость к шуму.

Для анализа нестационарных сигналов предложены адаптивные методы декомпозиции. Chand P., Davari A., Liu B. и Sedghisigarchi K. [27] разработали метод адаптивного гармонического вейвлет-преобразования (АНWT), обеспечивающий автоматическую подстройку базисных функций под форму сигнала. Это позволило повысить точность выделения информативных признаков при классификации возмущений.

Метрологические аспекты функционирования систем датчиков исследованы Peng H. и соавт. [28]. Авторы показали, что ориентация датчиков и расстояние до проводников существенно влияют на амплитуду и фазу измеренного сигнала, а также предложили алгоритм компенсации погрешностей, связанных с перекрестными наводками.

Проблема точности измерений гармонических составляющих подробно рассмотрена Diqiu S. и соавт. [29], которые предложили методы проектирования катушек Роговского с учетом влияния частоты и добротности цепи. Результаты моделирования подтвердили, что оптимизация геометрии катушки снижает фазовую ошибку измерений до  $0,2^\circ$ .

Сравнение различных методов определения вклада отдельных источников искажений проведено Gianesini B.M., Santos I.N. и Ribeiro P.F. [30]. Авторы предложили использовать эталонную тестовую систему IEEE Benchmark Test System для калибровки алгоритмов анализа гармоник и оценки вклада отдельных потребителей в общий спектр.

Таким образом, совокупность исследований [27-30] демонстрирует переход от контактных методов измерений к бесконтактным датчикам, интегрированным с современными методами спектрального анализа. Применение таких подходов позволяет создать основу для интеллектуальных систем диагностики состояния распределительных сетей и повышения достоверности оценки параметров качества электроэнергии.

Anggriawan D. O. и соавт. [31] предложили использовать нейронную сеть с адаптивной структурой для классификации событий качества электроэнергии по спектральным характеристикам. Авторы показали, что использование обучаемых весов позволяет распознавать тип возмущения по комбинации амплитуд гармоник и коэффициенту THD.

Bosnic J. A. и соавт. [32] продемонстрировали возможность идентификации нагрузки на основе гармонического состава токов.

Samanta I.S. и соавт. [33] применили решающие деревья для классификации PQ-событий. Предложенная структура позволила выполнять распознавание в реальном времени при минимальных вычислительных затратах, что особенно важно для встроженных систем мониторинга.

Gaouda A.M. и соавт. [34] исследовали многомасштабную декомпозицию сигналов методом вейвлетов и показали, что комбинация энергии и энтропии вейвлет-коэффициентов позволяет различать типы нарушений качества.

Janani K. и Himavathi S. [35] разработали алгоритм неинвазивной идентификации нагрузки с использованием гармонических признаков и машинного обучения. Работа подтвердила, что спектральные профили разных потребителей можно эффективно классифицировать без прямого доступа к электрическим цепям.

Rodrigues Junior W. L. и соавт. [36] предложили использовать сверточные нейронные сети (CNN) для автоматической классификации возмущений. Их модель

---

<sup>6</sup>IEC 61000-4-7:2008. Electromagnetic compatibility (EMC) – General guide on harmonics and interharmonics measurements. – IEC, 2008.

извлекает признаки непосредственно из временных диаграмм и обеспечивает высокую устойчивость к шуму.

Shafiullah M. и соавт. [37] разработали гибридную интеллектуальную систему, сочетающую методы вейвлет-анализа и нечеткой логики. Этот подход продемонстрировал улучшенную точность классификации по сравнению с классическими статистическими методами.

Gu I.Y.H. и Bollen M.H.J. [38] исследовали взаимосвязь между временной и частотной областями анализа. Авторы показали, что совмещение этих подходов позволяет не только классифицировать возмущения, но и оценивать их энергетическую значимость.

Lin W. -M. и соавт. [39] предложили алгоритм обнаружения множественных возмущений, основанный на вейвлет-пакетном преобразовании и адаптивной нейронной сети. Их метод обеспечивает автоматическую настройку параметров модели и высокую точность при перекрывающихся PQ-событиях.

Indu S. S. и соавт. [40] провели обширный сравнительный анализ машинных алгоритмов для идентификации событий качества электроэнергии. Авторы показали, что методы глубокого обучения превосходят традиционные подходы по устойчивости к шумам и скорости обучения.

Анализ литературных источников показывает, что совмещение классических методов спектрального анализа с алгоритмами машинного обучения обеспечивает комплексный подход к диагностике источников искажений. Применение гибридных архитектур (кратковременное преобразование Фурье (КВПФ) /вейвлет + ML) позволяет не только классифицировать возмущения по их спектральному признаку, но и выполнять адаптивную калибровку систем мониторинга. Это делает возможным внедрение интеллектуальных программно-аппаратных комплексов для идентификации источников искажений в сетях 6-10 кВ.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

Для повышения достоверности выявления источников гармонических и интергармонических искажений в распределительных сетях 6-10 кВ предложен алгоритм, основанный на комплексной обработке сигналов, регистрируемых бесконтактными индуктивными и емкостными датчиками электромагнитного поля. Алгоритм предусматривает последовательное выполнение следующих этапов:

- регистрация сигналов бесконтактных датчиков;
- спектральный анализ сигналов;
- формирование информативных признаков;
- сопоставление с эталонной базой и идентификация источника искажения ПКЭ.

#### ***Регистрация сигналов бесконтактных датчиков***

Сигналы, формируемые бесконтактными датчиками, зависят от протекающих по проводам ЛЭП токов и уровня напряжения проводов. Таким образом сигналы бесконтактных датчиков содержат косвенную информацию о токах и напряжениях в линии. Для обеспечения корректного анализа высших гармонических составляющих сигналы бесконтактных датчиков оцифровывались с частотой дискретизации 3,2 кГц, что обеспечило регистрацию диапазона высших гармоник сигнала вплоть до 32 порядка (1,6 кГц). Такая частота дискретизации является достаточной для анализа высших гармонических составляющих, характерных для процессов передачи электроэнергии на промышленной частоте электрического тока 50 Гц, что подтверждается в том числе нормативной документацией, принятой в РФ (ГОСТ 32144-2013). Данный диапазон близок к предлагаемому в работе Ribeiro P.F. [30] (до 2 кГц) для анализа спектра в общем случае при построении промышленных систем мониторинга.

#### ***Спектральный анализ сигналов***

Для выделения гармонических и интергармонических составляющих применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Однако, как в [38], использование только БПФ не позволяет корректно фиксировать кратковременные изменения сигнала во времени. Поэтому дополнительно используется метод КВПФ, позволяющий анализировать локальные временные участки.

#### ***Формирование информативных признаков***

Ключевым этапом алгоритма является извлечение информативных признаков из спектра сигнала. Метод анализа «спектральных подписей» (harmonic fingerprinting) стал основой для формирования спектральных характеристик для источников искажений сигналов бесконтактных датчиков различного типа.

#### ***Сопоставление с эталонной базой и идентификация источника искажения ПКЭ***

Полученные спектральные характеристики формируют эталонную библиотеку

«спектральных подписей» различных источников искажений.

В качестве информативных признаков для формирования «спектральной подписи» источника искажения используются следующие интерпретируемые параметры:

- процентное изменение амплитуды основной гармоники (50 Гц);
- изменение фазы основной гармоники (50 Гц);
- изменение коэффициента нелинейных искажений (THD);
- суммарные процентные изменения амплитуды для четных и нечетных высших гармоник;
- пять высших гармоник с наибольшим процентным изменением амплитуды.

Процентное изменение амплитуды основной гармоники (50 Гц) вычисляется согласно выражению:

$$\Delta A_{50}^{\%} = 100 \cdot \frac{A^{aft}(n_1) - A^{bef}(n_1)}{A^{bef}(n_1)}, \quad (1)$$

где  $\Delta A_{50}^{\%}$  – процентное изменение амплитуды основной гармоники 50 Гц, %;  $A^{bef}(n_1)$  – амплитуда основной гармоники (50 Гц) до возмущения;  $A^{aft}(n_1)$  – амплитуда основной гармоники (50 Гц) после возмущения.

В случае, если амплитуда основной гармоники близка к нулю:

$$\Delta A_{50}^{\%} = 100 \cdot \frac{2 \cdot (A^{aft}(n_1) - A^{bef}(n_1))}{|A^{aft}(n_1)| - |A^{bef}(n_1)| + \varepsilon}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – близкая к нулю положительная константа ( $10^{-12}$ ), о.е.

Изменение фазы основной гармоники (50 Гц) определяется по следующему выражению:

$$\Delta \varphi_{50} = \left( (\varphi^{aft}(n_1) - \varphi^{bef}(n_1) + 180^\circ) \bmod 360^\circ \right) - 180^\circ, \quad (3)$$

где  $\Delta \varphi_{50}$  – изменение фазы основной гармоники (50 Гц), град;  $\varphi^{bef}(n_1)$  – фаза основной гармоники (50 Гц) до возмущения, град;  $\varphi^{aft}(n_1)$  – фаза основной гармоники (50 Гц) после возмущения, град.

Изменение THD рассчитывается следующим образом:

$$\Delta THD^{\%} = 100 \cdot \left( \frac{\sqrt{\frac{1}{K}} \cdot \sum_{n \in N} (A^{bef}(n_1))^2}{A^{bef}(n_1)} - \frac{\sqrt{\frac{1}{K}} \cdot \sum_{n \in N} (A^{aft}(n_1))^2}{A^{aft}(n_1)} \right), \quad (4)$$

где  $\Delta THD^{\%}$  – изменение коэффициента нелинейных искажений, %;  $K = |N|$  – число гармоник в рассматриваемом частотном спектре;  $N = \{n \mid n \neq n_0, n \neq n_1\}$  – множество номеров гармоник за исключением постоянной составляющей и основной гармоники.

Суммарные процентные изменения амплитуды для четных и нечетных высших гармоник рассчитываются согласно выражениям:

$$\sum \Delta A_{even} = 100 \cdot \frac{\sum_{m \in \{2,4,6,\dots\}} (A^{aft}(n_m) - A^{bef}(n_m))}{A^{bef}(n_1)}, \quad (5)$$

$$\sum \Delta A_{odd} = 100 \cdot \frac{\sum_{m \in \{3,5,7,\dots\}} (A^{aft}(n_m) - A^{bef}(n_m))}{A^{bef}(n_1)}, \quad (6)$$

где  $\sum \Delta A_{even}$ ,  $\sum \Delta A_{odd}$  – суммарные процентные изменения амплитуды для четных и нечетных высших гармоник, %;  $m$  – множество номеров гармоник (четных/нечетных).

Процентное изменение амплитуды для высших гармоник определяется аналогично выражениям (1) и (2), но с использованием амплитуд заданных гармоник вместо основной гармоники.

#### Схема проведения экспериментов

Для верификации разработанного алгоритма диагностики источников искажений были проведены лабораторные испытания на основе масштабной имитационной модели ЛЭП 6-10 кВ, реализованной на напряжении 0,4 кВ. Целью экспериментов являлась оценка возможности идентификации источников гармонических и интергармонических

искажений на основе сигналов, полученных от индуктивных и емкостных датчиков.

Лабораторная установка состояла из трехфазного источника питания напряжением 0,4 кВ, управляемой нагрузки (основная резистивная нагрузка 1250 Вт на каждой фазе и дополнительные нагрузки), измерительного прибора для регистрации значений токов и напряжений и комплекта бесконтактных датчиков (3 индуктивных и 3 емкостных). Измерения выполнялись при различных типах нагрузок – активных, индуктивных и нелинейных. Схема лабораторной установки и расположения бесконтактных датчиков представлена на рисунке 1.

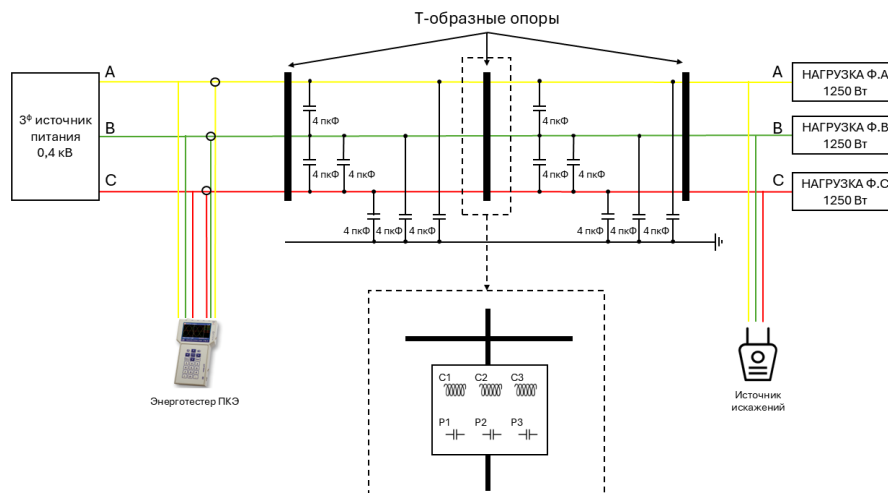


Рис. 1. Схема лабораторной установки и Fig. 1. The laboratory stand scheme and non-contact sensors placement

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В качестве экспериментов были промоделированы следующие режимы работы лабораторной установки:

- асинхронный двигатель 3 кВт на холостом;
- резистивная нагрузка (900 Вт), подключенная через трехфазный диодный мост;
- однофазная нелинейная нагрузка в фазе В (150 Вт).

Вблизи фазных проводов лабораторной установки (на расстоянии 1 м) устанавливались три индуктивных (C1, C2, C3) и три емкостных (P1, P2, P3) датчика, сигналы которых подавались на АЦП с частотой дискретизации 3,2 кГц и разрешением 16 бит. В качестве индуктивных датчиков использовались катушки индуктивности, а в качестве емкостных датчиков – пластины электрических конденсаторов. Данные обрабатывались программным комплексом с реализацией БПФ, КВПФ.

#### Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

В результате проведенных экспериментов были записаны сигналы бесконтактных датчиков и время произведения переключения режимов работы лабораторной установки. На рисунках 2, 4, 6 представлены результаты определения времени момента переключения (вертикальная пунктирная линия) на основе вычисления производной энергии основной гармоники (50 Гц) сигналов при помощи скользящего окна размером 256 отсчетов с шагом скольжения 64 отсчета (с агрегацией расчетов по группам датчиков – индуктивные и емкостные). На рисунках 3, 5, 7 представлены результаты БПФ на окне размером 256 отсчетов до и после определенного момента переключения (для одного из бесконтактных датчиков – датчика C2).

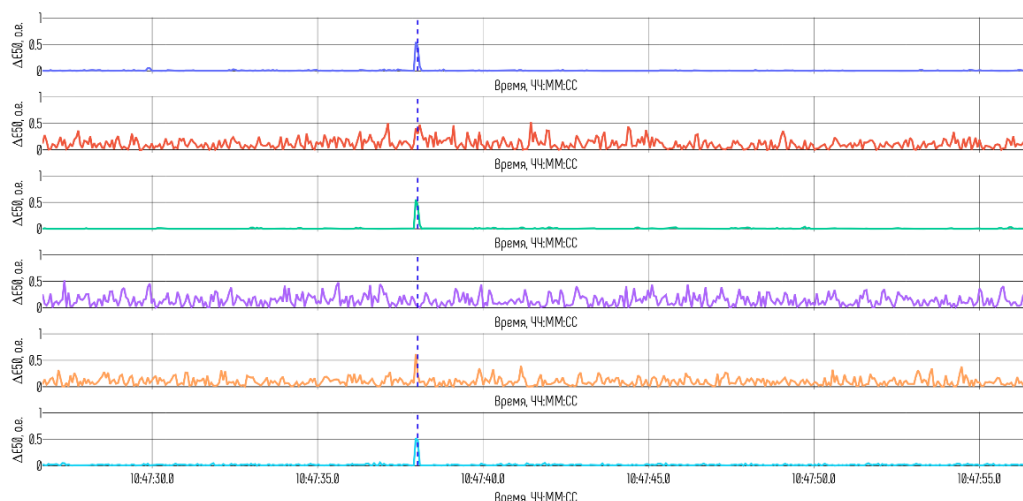


Рис. 2. Результаты определения времени момента подключения асинхронного двигателя (3 кВт) на холостом ходу (сигналы датчиков сверху-вниз – C1, C2, C3, P1, P2, P3)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

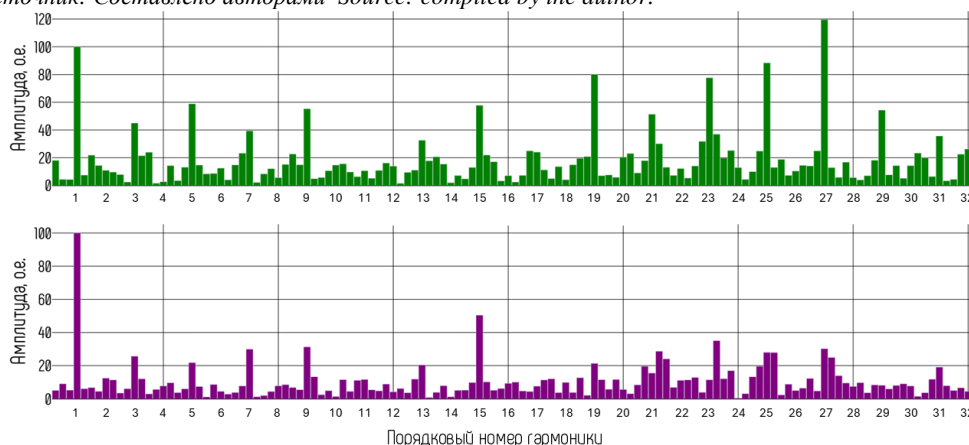


Рис. 3. Результаты БПФ для датчика C2 до и после момента подключения асинхронного двигателя (3 кВт) на холостом ходу

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 1  
Table 1

Спектральная подпись режима с дополнительным подключением асинхронного двигателя (3 кВт) на холостом ходу

*Spectral signature for asynchronous motor connection (3 kW) at idle*

Сигнал	$\Delta A_{50}$	$\Delta \varphi_{50}$	$THD_{bef}$	$THD_{aft}$	$\Delta THD$	$\Sigma \Delta A_{even}$	$\Sigma \Delta A_{odd}$
C1	48.7	-31.3	18.26	10.96	-7.3	19	-248
C2	65.6	-68.6	25.15	12.64	-12.51	-9.6	-279.9
C3	12.1	-38.1	10.13	8.61	-1.52	-34.5	-26.3
P1	5.5	-1.8	14.58	13.63	-0.96	35.6	-49.3
P2	-2.5	-5	5.77	5.36	-0.4	-13	-20.1
P3	2.1	-5.2	9.29	9.32	0.03	-61.9	38.3

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Высшие гармоники, для которых наблюдалось наибольшее изменение амплитуды в эксперименте с подключением асинхронного двигателя:

- Для датчика C1 –  $\Delta A_{11} = +1476.2\%$ ;  $\Delta A_{32} = +900.0\%$ ;  $\Delta A_{31} = +601.6\%$ ;  $\Delta A_{10} = +264.6\%$ ;  $\Delta A_7 = +162.0\%$ .
- Для датчика C2 –  $\Delta A_4 = +378.9\%$ ;  $\Delta A_{18} = +295.2\%$ ;  $\Delta A_{18} = +130.2\%$ ;  $\Delta A_{16} = +117.2\%$ ;  $\Delta A_{28} = +116.3\%$ .
- Для датчика C3 –  $\Delta A_2 = +445.7\%$ ;  $\Delta A_{22} = +177.9\%$ ;  $\Delta A_{17} = +145.9\%$ ;  $\Delta A_{32} = -$

93.7%;  $\Delta A4 = -91.1\%$ .

- Для датчика P1 –  $\Delta A4 = +539.1\%$ ;  $\Delta A22 = +460.8\%$ ;  $\Delta A28 = +356.7\%$ ;  $\Delta A24 = +272.9\%$ ;  $\Delta A8 = +197.2\%$ .

- Для датчика P2 –  $\Delta A27 = +1141.9\%$ ;  $\Delta A18 = +116.5\%$ ;  $\Delta A10 = +92.3\%$ ;  $\Delta A8 = -89.7\%$ ;  $\Delta A4 = -77.0\%$ .

- Для датчика P3 –  $\Delta A23 = +281.8\%$ ;  $\Delta A21 = +267.0\%$ ;  $\Delta A7 = +246.8\%$ ;  $\Delta A15 = +206.0\%$ ;  $\Delta A28 = +143.6\%$ .

В режиме подключения асинхронного двигателя мощностью 3 кВт на холостом ходу у индуктивных датчиков (C1, C2, C3) наблюдалось отчетливое снижение THD – в среднем на 7-12%. При этом амплитуда основной гармоники возрастала до 65% (датчик C2), что согласуется с возрастанием магнитной составляющей поля. Наиболее значительные изменения амплитуд высоких порядков гармоник зарегистрированы для датчиков C1 и C2 – увеличение  $A_{11}$  на 1476%,  $A_{32}$  на 900%. Это указывает на чувствительность индуктивных элементов к быстрым изменениям магнитного потока, связанным с пуском двигателя. Емкостные датчики (P1, P2, P3) в тех же условиях демонстрировали слабую динамику THD (менее 1%) и значительно меньшие фазовые отклонения (до  $\pm 5^\circ$ ), что объясняется их ориентацией на электрическую составляющую поля и меньшей восприимчивостью к токовым переходным процессам.

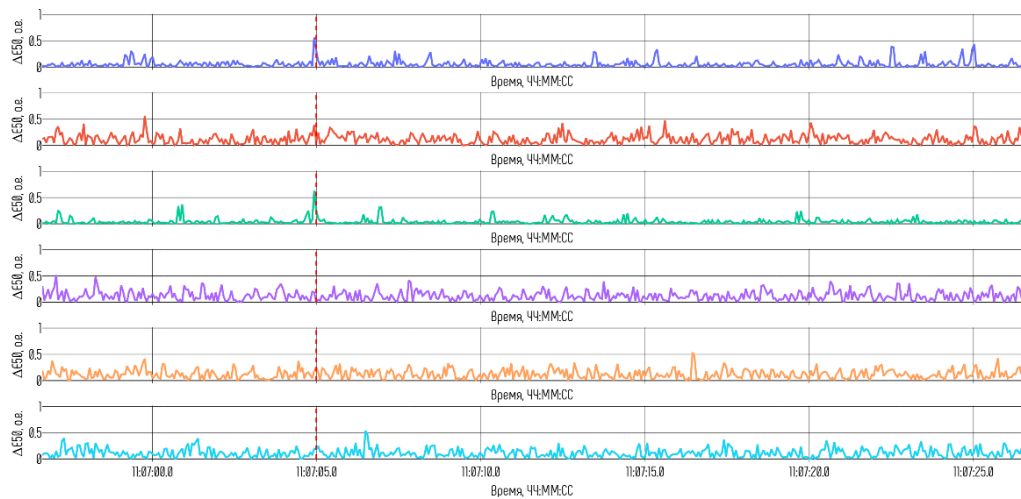


Рис. 4. Результаты определения времени момента подключения дополнительной резистивной нагрузкой (900 Вт), подключенной через трехфазный диодный мост (сигналы датчиков сверху-вниз – C1, C2, C3, P1, P2, P3)

Fig. 4. Results for the moment when additional resistive load (900 W) was connected via a three-phase diode bridge (sensor signals are shown from top to bottom: C1, C2, C3, P1, P2, and P3)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

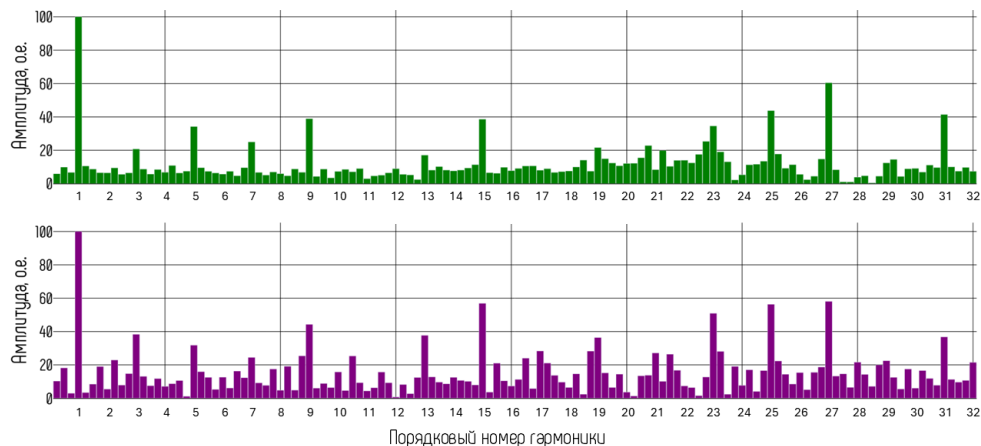


Рис. 5. Результаты БПФ для датчика C2 до и после момента подключения дополнительной резистивной нагрузкой (900 Вт), подключенной через трехфазный диодный мост

Fig. 5. FFT results for the C2 sensor before and after connection of additional resistive load (900 W) connected via a three-phase diode bridge

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 2  
Table 2

Спектральная подпись режима с дополнительной резистивной нагрузкой (900 Вт), подключенной через трехфазный диодный мост

*Spectral signature for additional resistive load (900 W) connected via a three-phase diode bridge*

Сигнал	$\Delta A_{50}$	$\Delta \varphi_{50}$	THD <sub>bef</sub>	THD <sub>aft</sub>	$\Delta$ THD	$\Sigma \Delta A_{\text{even}}\%$	$\Sigma \Delta A_{\text{odd}}$
C1	48.4	-3.8	16.48	10.85	-5.63	21.2	19.4
C2	1.8	-19.6	15.8	17.04	1.24	63.2	63
C3	26.8	-0.8	9.61	6.27	-3.34	-54.5	-44.9
P1	17.6	-5.2	16.58	15.1	-1.47	-4.8	66.5
P2	0.8	0.3	5.41	5.43	0.02	-5.4	-2.9
P3	-15.5	1.1	9.47	11.83	2.36	-4.5	13.1

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Высшие гармоники, для которых наблюдалось наибольшее изменение амплитуды в эксперименте с подключением дополнительной резистивной нагрузки, подключенной через трехфазный диодный мост:

- Для датчика C1 –  $\Delta A_{19} = +2313.1\%$ ;  $\Delta A_4 = +399.2\%$ ;  $\Delta A_6 = +382.2\%$ ;  $\Delta A_{22} = +275.6\%$ ;  $\Delta A_{10} = +150.1\%$ .
- Для датчика C2 –  $\Delta A_{30} = +491.2\%$ ;  $\Delta A_{14} = +407.7\%$ ;  $\Delta A_6 = +215.5\%$ ;  $\Delta A_{22} = +189.3\%$ ;  $\Delta A_{25} = +183.3\%$ .
- Для датчика C3 –  $\Delta A_{29} = +244.9\%$ ;  $\Delta A_{12} = -81.7\%$ ;  $\Delta A_8 = -74.5\%$ ;  $\Delta A_{28} = -69.8\%$ ;  $\Delta A_{19} = -69.0\%$ .
- Для датчика P1 –  $\Delta A_{29} = +1355.2\%$ ;  $\Delta A_{26} = +209.3\%$ ;  $\Delta A_7 = +184.1\%$ ;  $\Delta A_6 = +148.2\%$ ;  $\Delta A_{21} = +142.5\%$ .
- Для датчика P2 –  $\Delta A_{16} = +1550.8\%$ ;  $\Delta A_{24} = +1015.2\%$ ;  $\Delta A_{30} = +531.7\%$ ;  $\Delta A_4 = +254.5\%$ ;  $\Delta A_6 = +109.1\%$ .
- Для датчика P3 –  $\Delta A_{11} = +176.3\%$ ;  $\Delta A_{26} = +155.0\%$ ;  $\Delta A_8 = +148.0\%$ ;  $\Delta A_7 = +144.4\%$ ;  $\Delta A_{30} = +128.5\%$ .

При подключении дополнительной резистивной нагрузки 900 Вт через трехфазный диодный мост реакция датчиков изменилась. Для индуктивных сенсоров зафиксировано снижение THD на 3-6% (датчик C1) и рост амплитудных коэффициентов в области 5-й и 7-й нечетных гармоник. Емкостные датчики, напротив, показали значительный рост отдельных спектральных компонент: датчик P1 –  $A_{29}$  до +1355%, датчик P2 –  $A_{16}$  до +1551%. Это может быть связано с тем, что при выпрямлении формируется пульсирующее напряжение с ярко выраженными четными гармониками, воспринимаемыми преимущественно емкостными сенсорами.

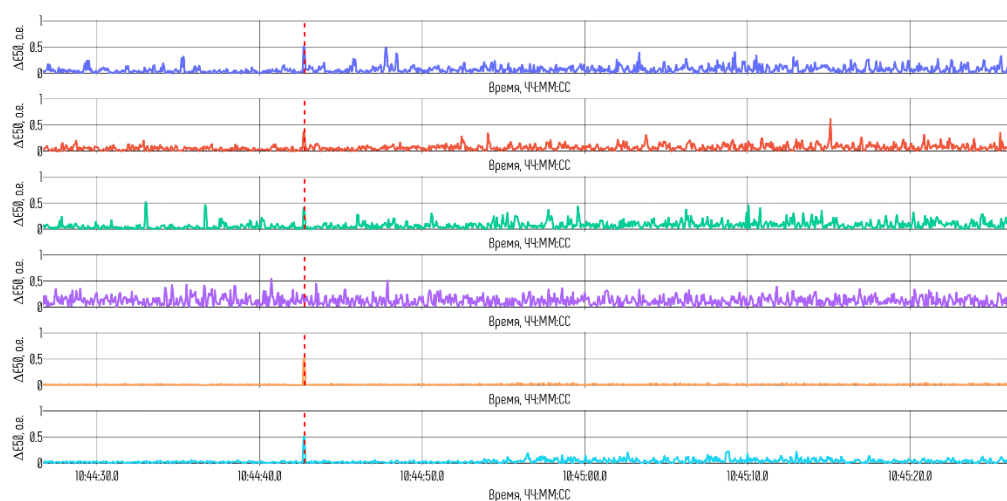


Рис. 6. Результаты определения времени момента подключения дополнительной однофазной нелинейной нагрузки в фазе В (150 Вт) (сигналы датчиков сверху-вниз – C1, C2, C3, P1, P2, P3) Fig. 6. Results for the moment when additional single-phase nonlinear load in phase B (150 W) (sensor signals are shown from top to bottom: C1, C2, C3, P1, P2, and P3)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

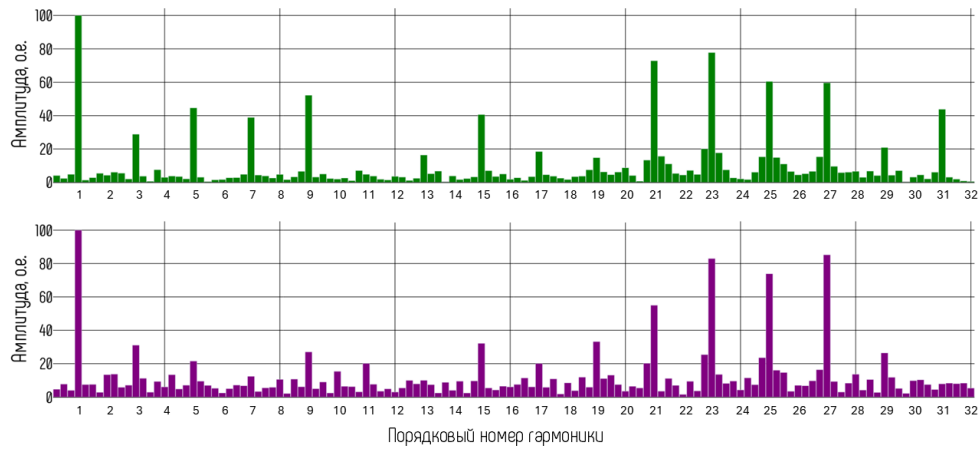


Рис. 7. Результаты БПФ для датчика C2 до и после момента подключения дополнительной однофазной нелинейной нагрузки в фазе В (150 Вт)

Fig. 7. FFT results for the C2 sensor before and after connection of additional single-phase nonlinear load in phase B (150 W)

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3

Table 3

Спектральная подпись режима с дополнительной однофазной нелинейной нагрузкой в фазе В (150 Вт)

Spectral signature for additional single-phase nonlinear load in phase B (150 W)

Сигнал	$\Delta A_{50}$	$\Delta \varphi_{50}$	$THD_{bef}$	$THD_{aft}$	$\Delta THD$	$\Sigma \Delta A_{even}^{\%}$	$\Sigma \Delta A_{odd}$
C1	1.3	7.3	17.92	21.9	3.98	52.9	103.1
C2	6.1	0.2	17.67	15.7	-1.97	-35.5	-88.6
C3	11.2	0.4	10.94	8.91	-2.03	-71.1	-58.3
P1	-8.5	-0.4	12.85	13.63	0.78	-33.4	14.5
P2	-3.4	0.9	4.87	5.33	0.45	-8.7	8.6
P3	-3.6	4.5	9.19	8.98	-0.21	-53.6	-10.3

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Высшие гармоники, для которых наблюдалось наибольшее изменение амплитуды в эксперименте с подключением однофазной нелинейной нагрузки в фазе В:

- Для датчика C1 –  $\Delta A_{32} = +818.8\%$ ;  $\Delta A_{19} = +375.4\%$ ;  $\Delta A_{22} = +299.4\%$ ;  $\Delta A_{18} = +217.1\%$ ;  $\Delta A_{17} = +201.8\%$ .

- Для датчика C2 –  $\Delta A_{32} = +2190.9\%$ ;  $\Delta A_4 = +612.5\%$ ;  $\Delta A_{29} = +131.5\%$ ;  $\Delta A_{27} = +101.0\%$ ;  $\Delta A_7 = -80.2\%$ .

- Для датчика C3 –  $\Delta A_{31} = +186.9\%$ ;  $\Delta A_{32} = -83.1\%$ ;  $\Delta A_{22} = -73.9\%$ ;  $\Delta A_9 = -66.8\%$ ;  $\Delta A_8 = -66.5\%$ .

- Для датчика P1 –  $\Delta A_9 = +669.5\%$ ;  $\Delta A_{28} = +299.2\%$ ;  $\Delta A_{27} = +255.6\%$ ;  $\Delta A_{20} = +189.5\%$ ;  $\Delta A_{19} = +154.3\%$ .

- Для датчика №P2 –  $\Delta A_{31} = +211.4\%$ ;  $\Delta A_{12} = +175.6\%$ ;  $\Delta A_{21} = +146.6\%$ ;  $\Delta A_{26} = +146.1\%$ ;  $\Delta A_{18} = +133.9\%$ .

- Для датчика P3 –  $\Delta A_{26} = +460.0\%$ ;  $\Delta A_{21} = +306.1\%$ ;  $\Delta A_{17} = +152.3\%$ ;  $\Delta A_{14} = -89.6\%$ ;  $\Delta A_{30} = -88.0\%$ .

В режиме подключения однофазной нелинейной нагрузки 150 Вт в фазе В выявлено увеличение THD на 2-4% и появление асимметрии спектра. Индуктивные датчики (C1, C2, C3) продемонстрировали рост амплитуд 17-22 гармоник до 300-400% и появление отрицательных изменений на высших порядках (например,  $A_{32} = -83\%$  у датчика C3), что свидетельствует о подавлении высокочастотных составляющих магнитного поля. Емкостные сенсоры (P1, P2, P3) зафиксировали преимущественно рост гармоник 9-27 порядков: у датчика P1  $\Delta A_9 = +669\%$ , у P2  $\Delta A_{31} = +211\%$ , у P3  $\Delta A_{26} = +460\%$ . Это демонстрирует их высокую чувствительность к фазным несбалансированным возмущениям электрического поля.

Таким образом, индуктивные датчики показали более высокую чувствительность к изменениям токовой нагрузки и динамике магнитного потока, а емкостные – к асимметрии и нелинейным искажениям напряжения. Различие реакций двух групп датчиков показывает, что их совместное использование формирует различающиеся

«спектральные подписи» для рассмотренных типов источников гармонических искажений.

Следует отметить, что для датчиков одного типа (С1–С3 или Р1–Р3) наблюдаются отличия в показаниях (как исходных сигналов, так и результатов спектральной обработки). Данные различия связаны с различиями взаимного расположения бесконтактных датчиков относительно проводов лабораторной установки и погрешностей в электрических параметрах датчиков (индуктивность, емкость), обусловленных допуском погрешности при изготовлении.

#### **Заключение (Conclusions)**

В работе рассмотрены современные подходы к контролю параметров качества электроэнергии в распределительных сетях 6-10 кВ с акцентом на использование бесконтактных методов измерения. Показано, что традиционные контактные системы мониторинга ограничены эксплуатационно-конструктивными условиями и не обеспечивают требуемую масштабируемость при поиске источников гармонических искажений. Проведенный анализ отечественных и международных нормативных документов (ГОСТ 32144–2013, IEC 61000-3-6, IEEE 519, EN 50160) выявил необходимость внедрения унифицированных алгоритмов измерений, способных учитывать динамические изменения спектра.

Разработан алгоритм контроля источников гармонических искажений, включающий этапы регистрации сигналов бесконтактных индуктивных и емкостных датчиков, спектрального преобразования (БПФ, КВПФ) и формирования спектральных признаков источников искажений. Экспериментальная проверка на лабораторной модели показала высокую корреляцию результатов между каналами разных типов. Индуктивные датчики продемонстрировали наибольшую чувствительность к вариациям токов и магнитного поля ( $\Delta THD \approx -7-12\%$ ), а емкостные – к асимметрии и высоким гармоникам (рост отдельных компонент  $> +1000\%$ ).

Анализ точного влияния взаимного расположения бесконтактных датчиков относительно проводов установки на различия в показаниях однотипных датчиков может быть рассмотрен в дальнейших исследованиях по данной тематике. Полученные в ходе лабораторных экспериментов «спектральные подписи» могут быть рассмотрены в качестве исходных данных для формирования эталонной библиотеки признаков и использованы в качестве входных параметров в алгоритмах классификации типов источников искажения. Построение и валидация конкретных моделей идентификации по этим признакам относится к задачам дальнейших исследований.

Научная новизна работы заключается в формировании и экспериментальном обосновании набора интерпретируемых спектральных признаков, описывающих влияние источников гармонических искажений (асинхронный двигатель, трехфазный диодный мост, однофазная нелинейная нагрузка) на сигналы бесконтактных индуктивных и емкостных датчиков электромагнитного поля. Дополнительно предложен критерий для автоматического определения момента возникновения события по сигналам бесконтактных датчиков по изменению основной гармоники (50 Гц). Практическая значимость состоит в возможности построения автономных интеллектуальных систем бесконтактного контроля параметров качества электроэнергии на основе предложенного алгоритма и набора спектральных признаков.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются расширение эталонной базы и интеграция разработанного алгоритма с методами машинного обучения для интеллектуальной классификации источников гармонических искажений и адаптации системы к реальным условиям эксплуатации.

#### **Литература**

1. Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotelo D., Duque-Perez O. A review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 20. – P. 6467. – DOI: 10.3390/en14206467.
2. Зубова Е.В., Федосов Д.С. Исследование условий возникновения резонанса на высших гармониках в электрической сети, питающей нелинейную нагрузку. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 83-95. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95.
3. Kaur J., Bath S.K. Harmonic distortion in power systems due to electronic control and renewable energy integration: a comprehensive review // *Discover Electronics*. – 2025. – Vol. 2. – Article 67. – DOI: 10.1007/s44291-025-00111-9.
4. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р. Кондуктометрический метод неразрушающего

- контроля параметров электрических кабелей / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2025. – Т. 27. – №2. – С. 3–19. – DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-3-19.
5. Минуллин Р.Г. Способы подключения аппаратуры локационного мониторинга к воздушным линиям электропередачи // Р.Г. Минуллин, А.А. Гранская, Э.Ю. Абдуллазянов, И.Г. Ахметова, Р.Г. Мустафин, В.А. Касимов / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 16–32. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-16-32.
6. Левин В.М., Боярова Д.А. Распределенная система предиктивного управления состоянием оборудования электрических сетей по наработке на дефект / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2025. – Т. 27. – № 3. – С. 123–134. – DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-123-134.
7. Зарипов Д.К. Экспериментальное лабораторное исследование возможности выявления загрязнения высоковольтных изоляторов с помощью тепловизора / Д.К. Зарипов, Д.Ф. Закиров, Б.П. Тарасов, Е.А. Миронова, Р.А. Насибуллин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2024. – Т. 26. – № 6. – С. 5–19. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19.
8. Крюков А.В., Овечкин И.С., Суслов К.В. Моделирование режимов двойных замыканий на землю в системах электроснабжения нетяговых потребителей железнодорожного транспорта / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2024. – Т. 26. – № 2. – С. 138–148. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-2-138-148.
9. Тюрин А.Н., Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р. Проверка на работоспособность при замыкании на землю аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2024. – Т. 26. – № 4. – С. 41–54. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-4-41-54.
10. Ali Z. M., Calasan M., Jurado F. and Abdel Aleem S. H. E. Complexities of Power Quality and Harmonic-Induced Overheating in Modern Power Grids Studies: Challenges and Solutions // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 151554–151597. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3477729.
11. Arrillaga J., Watson N.R. Power System Harmonics. – 2nd ed. – Wiley, 2003. – 382 p. – DOI: 10.1002/0470871229.
12. Al-Feilat E. a. A., El-Amin I., Bettayeb M. Power system harmonic estimation: a comparative study // Electric Power Systems Research. – 1994. – № 2(29). – P. 91–97. – DOI: 10.1016/0378-7796(94)90066-3.
13. Chen K.L., Hu W.J., Xu W. Contactless Voltage Sensor for Overhead Transmission Lines // IET Gener., Transm. & Distrib. – 2018. – Vol. 12, No. 3. – P. 687–693. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.1181.
14. Sun S., Ma F., Yang Q., Ni H., Bai T., Ke K., Qiu Z. Research on Non-Contact Voltage Measurement Method Based on Near-End Electric Field Inversion // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 18. – P. 6468. – DOI: 10.3390/en16186468.
15. Zhang W., Yang Y., Zhao J., Huang R., Cheng K., He M.. Research on a Non-Contact Multi-Electrode Voltage Sensor and Signal Processing Algorithm // Sensors. – 2022. – Vol. 22. – № 21. – DOI: 10.3390/s22218573.
16. Testa A. et al. Interharmonics: Theory and Modeling // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22. – №. 4. – P. 2335–2348. – DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905505.
17. Barros J., Diego R.I., de Apraiz M. Applications of wavelets in electric power quality: Voltage events // Electric Power Systems Research. – 2012. – 88. – P. 130–136. – DOI: 10.1016/j.epsr.2012.02.009.
18. Dash P.K., Pradhan A.K., Panda G. Power quality analysis using S-transform // IEEE Power Engineering Review. – 2002. – Vol. 22. – № 18(2). – P. 60–60. – DOI: 10.1109/MPER.2002.4312414.
19. Schirmer P. A., Mporas I. Non-Intrusive Load Monitoring: A Review // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2023. – Vol. 14. – № 1. – P. 769–784. – DOI: 10.1109/TSG.2022.3189598.
20. Sandler R., Brehm M., Slomovitz D., Barreto G. Rogowski Coil Design for the Measurement of High Voltage Harmonics // Proc. 2020 IEEE PES T&D Latin America. – Montevideo, Uruguay, 2020. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/TDLA47668.2020.9326218.
21. Peng H., Liu H., Shang K., Li G., Zhao L. Design and Simulation Test of Non-Contact Voltage Sensor // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – DOI: 10.3390/s25103118.
22. Kruphalan T.S., Olof A. F., Daniel M., Fatemeh G., Nathaniel T., Martin N. Non-contact Current Measurement in Power Transmission Lines // Procedia Technology. – 2015. – Vol. 21. – P. 498–506. – DOI: 10.1016/j.protcy.2015.10.034.
23. Roman H., Vaclav K., Mikolaj B., Tomas M., Petr O., Jacob V. A Development of a Capacitive Voltage Divider for High Voltage Measurement as Part of a Combined Current and Voltage Sensor // electronic measurements. – 2020. – Vol. 26. – № 4. – P. 25–31. – DOI: 10.5755/j01.eie.26.4.25888.
24. Han Z., Xue F., Yang G., Yu Z., Hu J., He J. Micro-Cantilever Capacitive Sensor for High-Resolution Measurement of Electric Fields // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 32. – № 8. – P. 4317–4324. – DOI: 10.1109/JSEN.2020.3031291.

25. Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R.P. Localization of the complex spectrum: the S transform // IEEE Trans. Signal Processing. – 1996. – 44(4). – P. 998–1001. – DOI: 10.1109/78.492555.
26. Yan R., Gao R.X. Energy-Based Feature Extraction for Defect Diagnosis in Rotary Machines // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009. – Vol. 58. – № 9. – P. 3130–3139. – DOI: 10.1109/TIM.2009.2016886.
27. Chand P., Davari A., Liu B., Sedghisigarchi K. Feature extraction of Power Quality disturbances using Adaptive Harmonic Wavelet Transform // Proc. 39th Southeastern Symp. on System Theory. – Macon, GA, USA, 2007. – P. 266–269. – DOI: 10.1109/SSST.2007.352362.
28. Peng H., Liu H., Shang K., Li G., Zhao L. Design and Simulation Test of Non-Contact Voltage Sensor // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – № 10. – DOI: 10.3390/s25103118.
29. Diqiu S., Bei H., Xufeng W., Mingdong Z., Liang W., Wenxing L. Research on Harmonic Characteristic of Electronic Current Transformer Based on the Rogowski Coil // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 199. – DOI: 10.1088/1757-899X/199/1/012123.
30. Giancesini B.M., Santos I.N., Ribeiro P.F. Comparison of Methods for Determining Harmonic Distortion Contributions Using the IEEE Benchmark Test System // IEEE Trans. Power Delivery. – 2023. – 38(4). – P. 2398–2407. – DOI: 10.1109/TPWRD.2023.3242942.
31. Anggriawan D. O., Amsyar A., Prasetyono, E., Wahjono E., Sudiharto I., Tjahjono, A. Load Identification Using Harmonic Based on Probabilistic Neural Network // EMITTER International Journal of Engineering Technology. – 2019. – Vol. 7. – № 1. – P. 71–82. – DOI: 10.24003/emitter.v7i1.330.
32. Bosnic J. A., Petrovic G., Putnik A., Mostarac P. Power quality disturbance classification based on wavelet transform and support vector machine // In Proceedings of the 2017 11th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia/ – 2017. – P. 9–13. – DOI: 10.23919/MEASUREMENT.2017.7983524.
33. Samanta I.S., Rout P.K., Mishra S. Feature extraction and power quality event classification using Curvelet transform and optimized extreme learning machine // Electr Eng. – 2021. – Vol. 103. – P. 2431–2446. – DOI: 10.1007/s00202-021-01243-3.
34. Gaouda A. M., Kanoun S. H., Salama M. M. A., Chikhani A. Y. Pattern recognition applications for power system disturbance classification // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – Vol. 17. – № 3. – P. 677–683. – DOI: 10.1109/TPWRD.2002.1022786.
35. Janani K., Himavathi S. Non-intrusive harmonic source identification using neural networks // In Proceedings of the 2013 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai, India. – 2013. – P. 59–64. – DOI: 10.1109/ICCPEIC.2013.6778499.
36. Rodrigues Junior W. L., Silva Borges F. A., Lira Rabelo R. d. A., de Lima B. V. A., Almeida de Alencar J. E. Classification of Power Quality Disturbances Using Convolutional Network and Long Short-Term Memory Network // 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Budapest, Hungary. – 2019. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/IJCNN.2019.8852287.
37. Shafiullah M. et al. An Intelligent Approach for Power Quality Events Detection and Classification // In Proceedings of the 2021 1st International Conference on Artificial Intelligence and Data Analytics (CAIDA), Riyadh, Saudi Arabia, – 2021. – P. 194–199, – DOI: 10.1109/CAIDA51941.2021.9425215.
38. Gu Y.H., Bollen M.H.J. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15. – № 4. – P. 1279–1284. – DOI: 10.1109/61.891515.
39. Lin W. -M. Wu C. -H., Lin C. -H, Cheng F. -S. Detection and Classification of Multiple Power-Quality Disturbances With Wavelet Multiclass SVM // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23. – № 4. – P. 2575–2582/ – doi: 10.1109/TPWRD.2008.923463.
40. Indu S. S., et al. Artificial intelligence and machine learning techniques for power quality event classification: a focused review and future insights // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 25. – DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103873.

#### Авторы публикации

**Брамм Андрей Михайлович** – мл. научный сотрудник научной лаборатории цифровых двойников в электроэнергетике Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-1868-4389>. *am.bramm@urfu.ru*.

**Хальясмаа Александра Ильмаровна** – канд. техн. наук, доцент, заведующий научной лабораторией цифровых двойников в электроэнергетике Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5327-6076>. [a.i.khaliasmaa@urfu.ru](mailto:a.i.khaliasmaa@urfu.ru).

**Матренин Павел Викторович** – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории цифровых двойников в электроэнергетике Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>. [p.v.matrenin@urfu.ru](mailto:p.v.matrenin@urfu.ru).

**Ерошенко Станислав Андреевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника» Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9617-2154>. [s.a.eroshenko@urfu.ru](mailto:s.a.eroshenko@urfu.ru).

#### References

1. Arranz-Gimon A., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotelo D., Duque-Perez O. A review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 20. – P. 6467. – DOI: 10.3390/en14206467.
2. Zubova E.V., Fedosov D.S. Study of resonance conditions on higher harmonics in an electrical network supplying a nonlinear load / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2024. – Vol. 26. – № 3. – P. 83-95. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-83-95.
3. Kaur J., Bath S.K. Harmonic distortion in power systems due to electronic control and renewable energy integration: a comprehensive review // *Discover Electronics*. – 2025. – Vol. 2. – Article 67. – DOI: 10.1007/s44291-025-00111-9.
4. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Conductometric method of nondestructive testing of electric cable parameters / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2025. – Vol. 27. – №2. – P. 3–19. – DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-3-19.
5. Minullin R.G. Connecting methods of location monitoring equipment to overhead power lines // R.G. Minullin, A.A. Granskaya, E.Yu. Abdullazyanov, I.G. Akhmetova, R.G. Mustafin, V.A. Kasimov / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2024. – Vol. 26. – № 3. – P. 16–32. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-3-16-32.
6. Levin V.M., Boyarova D.A. Distributed predictive control system for the condition of power grid equipment based on the operating time for a defect / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2025. – Vol. 27. – № 3. – P. 123–134. – DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-123-134.
7. Zaripov D.K. Experimental study of the possibility of detecting contamination of high-voltage insulators with the help of a thermal imager / D.K. Zaripov, D.F. Zakirov, B.P. Tarasov, E.A. Mironova, R.A. Nasibullin // *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2024. – Vol. 26. – № 6. – P. 5–19. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19.
8. Kryukov A.V., Ovechkin I.S., Suslov K.V. Modeling of double ground fault modes in power supply systems of non-traction consumers of railway transport / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2024. – Vol. 26. – № 2. – P. 138–148. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-2-138-148.
9. Tyurin A.N., Soluyanov Yu.I., Akhmetshin A.R. Testing the operation of protection devices against parallel arc breakdown and spark gaps in the event of a ground fault / *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2024. – Vol. 26. – № 4. – P. 41–54. – DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-4-41-54.
10. Ali Z. M., Calasan M., Jurado F. and Abdel Aleem S. H. E. Complexities of Power Quality and Harmonic-Induced Overheating in Modern Power Grids Studies: Challenges and Solutions // *IEEE Access*. – 2024. – Vol. 12. – P. 151554–151597. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3477729.
11. Arrillaga J., Watson N.R. *Power System Harmonics*. – 2nd ed. – Wiley, 2003. – 382 p. – DOI: 10.1002/0470871229.
12. Al-Feilat E. a. A., El-Amin I., Bettayeb M. Power system harmonic estimation: a comparative study // *Electric Power Systems Research*. – 1994. – № 2(29). – P. 91–97. – DOI: 10.1016/0378-7796(94)90066-3.
13. Chen K.L., Hu W.J., Xu W. Contactless Voltage Sensor for Overhead Transmission Lines // *IET Gener., Transm. & Distrib.* – 2018. – Vol. 12, No. 3. – P. 687–693. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.1181.
14. Sun S., Ma F., Yang Q., Ni H., Bai T., Ke K., Qiu Z. Research on Non-Contact Voltage Measurement Method Based on Near-End Electric Field Inversion // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, No. 18. – P. 6468. – DOI: 10.3390/en16186468.
15. Zhang W., Yang Y., Zhao J., Huang R., Cheng K., He M.. Research on a Non-Contact Multi-Electrode Voltage Sensor and Signal Processing Algorithm // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – № 21. – DOI: 10.3390/s22218573.

16. Testa A. et al. Interharmonics: Theory and Modeling // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22. – № 4. – P. 2335–2348. – DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905505.
17. Barros J., Diego R.I., de Apraiz M. Applications of wavelets in electric power quality: Voltage events // Electric Power Systems Research. – 2012. – 88. – P. 130–136. – DOI: 10.1016/j.epsr.2012.02.009.
18. Dash P.K., Pradhan A.K., Panda G. Power quality analysis using S-transform // IEEE Power Engineering Review. – 2002. – Vol. 22. – № 18(2). – P. 60–60. – DOI: 10.1109/MPER.2002.4312414.
19. Schirmer P. A., Mporas I. Non-Intrusive Load Monitoring: A Review // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2023. – Vol. 14. – № 1. – P. 769–784. – DOI: 10.1109/TSG.2022.3189598.
20. Sandler R., Brehm M., Slomovitz D., Barreto G. Rogowski Coil Design for the Measurement of High Voltage Harmonics // Proc. 2020 IEEE PES T&D Latin America. – Montevideo, Uruguay, 2020. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/TDLA47668.2020.9326218.
21. Peng H., Liu H., Shang K., Li G., Zhao L. Design and Simulation Test of Non-Contact Voltage Sensor // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – DOI: 10.3390/s25103118.
22. Kruphalan T.S., Olof A. F., Daniel M., Fatemeh G., Nathaniel T., Martin N. Non-contact Current Measurement in Power Transmission Lines // Procedia Technology. – 2015. – Vol. 21. – P. 498–506. – DOI: 10.1016/j.protcy.2015.10.034.
23. Roman H., Vaclav K., Mikolaj B., Tomas M., Petr O., Jacob V. A Development of a Capacitive Voltage Divider for High Voltage Measurement as Part of a Combined Current and Voltage Sensor // electronic measurements. – 2020. – Vol. 26. – № 4. – P. 25–31. – DOI: 10.5755/j01.eie.26.4.25888.
24. Han Z., Xue F., Yang G., Yu Z., Hu J., He J. Micro-Cantilever Capacitive Sensor for High-Resolution Measurement of Electric Fields // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 32. – № 8. – P. 4317–4324. – DOI: 10.1109/JSEN.2020.3031291.
25. Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R.P. Localization of the complex spectrum: the S transform // IEEE Trans. Signal Processing. – 1996. – 44(4). – P. 998–1001. – DOI: 10.1109/78.492555.
26. Yan R., Gao R.X. Energy-Based Feature Extraction for Defect Diagnosis in Rotary Machines // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009. – Vol. 58. – № 9. – P. 3130–3139. – DOI: 10.1109/TIM.2009.2016886.
27. Chand P., Davari A., Liu B., Sedghisigarchi K. Feature extraction of Power Quality disturbances using Adaptive Harmonic Wavelet Transform // Proc. 39th Southeastern Symp. on System Theory. – Macon, GA, USA, 2007. – P. 266–269. – DOI: 10.1109/SSST.2007.352362.
28. Peng H., Liu H., Shang K., Li G., Zhao L. Design and Simulation Test of Non-Contact Voltage Sensor // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – № 10. – DOI: 10.3390/s25103118.
29. Diqiu S., Bei H., Xufeng W., Mingdong Z., Liang W., Wenxing L. Research on Harmonic Characteristic of Electronic Current Transformer Based on the Rogowski Coil // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 199. – DOI: 10.1088/1757-899X/199/1/012123.
30. Giancesini B.M., Santos I.N., Ribeiro P.F. Comparison of Methods for Determining Harmonic Distortion Contributions Using the IEEE Benchmark Test System // IEEE Trans. Power Delivery. – 2023. – 38(4). – P. 2398–2407. – DOI: 10.1109/TPWRD.2023.3242942.
31. Anggriawan D. O., Amsyar A., Prasetyono, E., Wahjono E., Sudiharto I., Tjahjono, A. Load Identification Using Harmonic Based on Probabilistic Neural Network // EMITTER International Journal of Engineering Technology. – 2019. – Vol. 7. – № 1. – P. 71–82. – DOI: 10.24003/emitter.v7i1.330.
32. Bosnic J. A., Petrovic G., Putnik A., Mostarac P. Power quality disturbance classification based on wavelet transform and support vector machine // In Proceedings of the 2017 11th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia/ – 2017. – P. 9–13. – DOI: 10.23919/MEASUREMENT.2017.7983524.
33. Samanta I.S., Rout P.K., Mishra S. Feature extraction and power quality event classification using Curvelet transform and optimized extreme learning machine // Electr Eng. – 2021. – Vol. 103. – P. 2431–2446. – DOI: 10.1007/s00202-021-01243-3.
34. Gaouda A. M., Kanoun S. H., Salama M. M. A., Chikhani A. Y. Pattern recognition applications for power system disturbance classification // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – Vol. 17. – № 3. – P. 677–683. – DOI: 10.1109/TPWRD.2002.1022786.
35. Janani K., Himavathi S. Non-intrusive harmonic source identification using neural networks // In Proceedings of the 2013 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai, India. – 2013. – P. 59–64. – DOI: 10.1109/ICCPEIC.2013.6778499.
36. Rodrigues Junior W. L., Silva Borges F. A., Lira Rabelo R. d. A., de Lima B. V. A., Almeida de Alencar J. E. Classification of Power Quality Disturbances Using Convolutional Network and Long Short-Term Memory Network // 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Budapest, Hungary. – 2019. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/IJCNN.2019.8852287.
37. Shafiullah M. et al. An Intelligent Approach for Power Quality Events Detection and Classification // In Proceedings of the 2021 1st International Conference on Artificial Intelligence and

Data Analytics (CAIDA), Riyadh, Saudi Arabia, – 2021. – P. 194–199, – DOI: 10.1109/CAIDA51941.2021.9425215.

38. Gu Y.H., Bollen M.H.J. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15. – № 4. – P. 1279–1284. – DOI:10.1109/61.891515.

39. Lin W. -M. Wu C. -H., Lin C. -H, Cheng F. -S. Detection and Classification of Multiple Power-Quality Disturbances With Wavelet Multiclass SVM // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23. – № 4. – P. 2575–2582/ – doi: 10.1109/TPWRD.2008.923463.

40. Indu S. S., et al. Artificial intelligence and machine learning techniques for power quality event classification: a focused review and future insights // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 25. – DOI:10.1016/j.rineng.2024.103873.

#### **Authors of the publication**

**Andrey M. Bramm** – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-1868-4389>. [am.bramm@urfu.ru](mailto:am.bramm@urfu.ru).

**Alexandra I. Khalyasmaa** – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-5327-6076>. [a.i.khalyasmaa@urfu.ru](mailto:a.i.khalyasmaa@urfu.ru).

**Pavel V. Matrenin** – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>. [p.v.matrenin@urfu.ru](mailto:p.v.matrenin@urfu.ru).

**Stanislav A. Eroshenko** – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-9617-2154>. [s.a.eroshenko@urfu.ru](mailto:s.a.eroshenko@urfu.ru).

*Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды*

**Получено** **21.10.2025 г.**

**Отредактировано** **17.01.2026 г.**

**Принято** **26.01.2026 г.**