

Автоматизированная обработка данных системы контроля параметров ЛЭП 6–10 кВ с применением бесконтактных датчиков

А.М. Брамм^а, А.И. Хальясмаа^б

Уральский энергетический институт Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, Екатеринбург, Россия

^а am.bramm@urfu.ru, ^б a.i.khaliasmaa@urfu.ru.

^а <https://orcid.org/0000-0002-1868-4389>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-5327-6076>

Статья поступила 12.01.2026, принята 13.04.2026

В работе представлена система бесконтактного контроля функционирования линий электропередачи среднего напряжения, регистрирующая электромагнитное поле в ближней зоне фазных проводников, с использованием индукционных и ёмкостных бесконтактных датчиков. Сигналы датчиков отражают суперпозицию полей от всех ближайших источников, зависят от геометрии установки и отличаются степенью зашумленности, что усложняет прямую интерпретацию сигналов и обуславливает необходимость автоматизации их обработки. Предложен алгоритм автоматизированного анализа сигналов, работающих с исходными сигналами датчиков. Для каждого измерительного канала вычисляется кратковременное преобразование Фурье (КВПФ), далее на основании энергии основной гармонической составляющей определяется момент изменения параметров линии электропередачи. Работа алгоритма протестирована на результатах полевых испытаний системы контроля параметров линии электропередачи 10 кВ в условиях изменения напряжения при переключении положения отпайки устройства регулирования напряжения под нагрузкой трансформатора на головной подстанции 110/10 кВ. Установлено, что в одном из фрагментов событие детектируется преимущественно по ёмкостным каналам, а в другом – по индуктивным, что согласуется с физикой восприятия полей разными типами датчиков. Полученные результаты демонстрируют технологическую реализуемость бесконтактного контроля функционирования линии электропередачи среднего напряжения без вывода линии из работы, а также эффективность предложенного алгоритма в роли детектора событий и инструмента для интерпретации изменений по измерительным каналам и группам датчиков. Однако подчеркивается необходимость дальнейшего исследования устойчивости диагностических признаков для формирования надёжной системы идентификаторов изменения режимов работы линий электропередачи среднего напряжения.

Ключевые слова: ЛЭП; бесконтактные датчики; мониторинг; обработка данных; частотный спектр; преобразование Фурье.

Automated data processing for the 6-10 kV OHTL's parameter control system using non-contact sensor

A.M. Bramm^а, A.I. Khalyasmaa^б

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; 19, Mira St., Ekaterinburg, Russia

^а am.bramm@urfu.ru, ^б a.i.khalyasmaa@urfu.ru,

^а <https://orcid.org/0000-0002-1868-4389>, ^б <https://orcid.org/0000-0001-5327-6076>.

Received 12.01.2026, accepted 13.04.2026

The paper presents a contactless monitoring system that uses induction and capacitive sensors to detect the electromagnetic field near conductors. The sensor signals are a superposition of all nearby sources and vary depending on the installation geometry, making it difficult to directly interpret the signals and automate their processing. An automated analysis algorithm has been proposed that works with initial sensor data. Short-term Fourier transform (STFT) is calculated for each channel to determine the moment when the transmission line's parameters change based on the energy of the dominant harmonic component. The algorithm is tested using field test results from a transmission line parameter monitoring system, under conditions where the voltage changed from 10 kV to 110/10 kV at a substation. It has been established that in one of the studied fragments, disturbances are detected mainly through capacitive channels, and in the other, through inductive channels. This is consistent with the physical principles of field perception by different types of sensors. The results obtained demonstrate the feasibility of contactless monitoring of transmission line parameters at 6–10 kV without shutting down the line. The proposed algorithm is effective as an event detector and as a tool for interpreting changes in channel and sensor group data. However, it is important to further study the stability of diagnostic features to develop a reliable identification system.

Keywords: OHTL; non-contact sensors; monitoring; data processing; frequency spectrum; Fourier transform.

Введение и обзор литературы по теме исследования. Распределительные электрические сети класса напряжения 6–10 кВ являются одним из ключевых звеньев современной электроэнергетики. Именно на этом уровне осуществляется подключение промышленных,

коммунально-бытовых и сельских потребителей, интегрируется распределённая генерация. От стабильности и управляемости распределительных сетей напрямую зависят показатели надёжности электроснабжения, качества электроэнергии, а также экономические эффекты

от цифровизации сетевой инфраструктуры [1–3]. В то же время эксплуатация распределительных сетей осложняется множеством факторов: высоким уровнем износа основных фондов, разнообразием схемных решений и используемого оборудования, разветвлённостью топологии, сезонно изменчивыми условиями окружающей среды, значительной протяжённостью линий электропередачи (ЛЭП), а также продолжительными процессами выполнения ремонтных работ [1–3]. В этих условиях требования к оперативному контролю состояния ЛЭП, как и к средствам контроля неуклонно возрастают – оператору сетей нужны доступные и надёжные инструменты, позволяющие фиксировать изменение параметров ЛЭП и локализовывать причины отклонений без увеличения числа отключений и выездов оперативно-выездных бригад.

Наиболее распространённые решения контроля и мониторинга параметров ЛЭП 6–10 кВ опираются на прямые (контактные) измерения токов и напряжений: трансформаторы тока и напряжения на концевых подстанциях (ПС); «интеллектуальные» коммутационные аппараты с измерительными блоками; регистраторы качества электроэнергии и т. д. На практике значительная часть таких систем требует отключения электроснабжения потребителей при установке, ревизии или модернизации датчиков. Кроме того, контактные системы контроля сопряжены с дополнительными требованиями к изоляционным свойствам конструкции и безопасной установке на токоведущих частях.

Именно необходимость отключений, а также необходимость проведения высотных работ при монтаже усложняют развёртывание систем контроля и мониторинга на действующих участках сетей и повышают стоимость жизненного цикла традиционных решений [1–3]. Эти ограничения систематически отмечаются в прикладных исследованиях по неинвазивному контролю линий, например, в работах IET и IEEE подчёркивается, что безопасный, дистанционный (бесконтактный) мониторинг способен снизить риски и упростить внедрение полевых измерений на ЛЭП [4–8].

За последнее десятилетие, по мере развития чувствительных магнитных и электрических сенсоров, активно формируется альтернатива контактным системам измерений – использование бесконтактных индукционных (магнитных) и ёмкостных (электрических) датчиков, регистрирующих параметры электромагнитного поля (ЭМП) вблизи проводников, без гальванического подключения к токоведущим частям (ТВЧ) ЛЭП. В исследованиях [4, 5] показана возможность реконструкции фазных напряжений по измерениям напряжённости электрического поля с помощью массивов ёмкостных зондов, оценки токов и даже механических параметров ЛЭП (провес, наклон опоры) по измерениям магнитной индукции с использованием матриц магниторезистивных датчиков [7, 9], а также мониторинга постоянного и переменного напряжения ЛЭП на основе совместного анализа электрической и магнитной компонент электромагнитного поля (ЭМП) [6].

Данные подходы эффективны для ретрофита – датчики могут устанавливаться на траверсах и элементах опор под проводами ЛЭП, без касания ТВЧ и необходимости перерыва электроснабжения [4–7, 9].

В российском научном сообществе интерес к бесконтактным электроиндукционным и ёмкостным датчикам также стабильно растёт. Как в задачах определения расположения источников ЭМП, так и в прикладных задачах контроля параметров электроустановок. В частности, в [10] рассмотрены возможности использования электроиндукционных датчиков для нахождения местоположения источников электромагнитного поля в окружающей среде. Результаты подтверждают практическую применимость таких сенсоров в задачах диагностики и контроля. Кроме того, потенциал использования характеристик магнитного и электрического полей ЛЭП для описания различных режимов работы ЛЭП [11, 12] и определения параметров ЛЭП для проведения расчётов в фазных координатах [13]. В международной литературе также описаны многочисленные конфигурации датчиков и алгоритмов восстановления первичных величин (ток/напряжение) по полевым измерениям в ближней зоне ЛЭП, а также методы повышения устойчивости оценок при изменении положения датчиков, геометрии трассы [14–17].

Отдельной методологической опорой для неинвазивного контроля служит анализ частотного спектра сигналов. В энергетике методы спектрального анализа – от классического БПФ до кратковременного преобразования Фурье (КВПФ) – давно доказали эффективность в распознавании событий изменения показателей качества электроэнергии: провалов напряжений, появления высших гармоник (ВГ) и других возмущений [13–18]. Накопленная международная практика (IEEE, IET, MDPI, Springer Nature) подтверждает, что такой анализ повышает чувствительность и интерпретируемость детекторов событий, в том числе при зашумлённости и нестационарности сигналов [16–21].

В данной работе исследуется подход к автоматизации контроля параметров ЛЭП 6–10 кВ, основанный на регистрации изменения ЭМП бесконтактными индукционными и ёмкостными датчиками с последующей спектральной обработкой. Предлагаемая архитектура системы контроля параметров ЛЭП 6–10 кВ сочетает три свойства:

- отсутствие необходимости отключения линии при монтаже первичных преобразователей;
- возможность установки на существующих опорах и траверсах без вмешательства в силовые цепи;
- пригодность для дистанционного выявления/верификации возмущений.

Применение предлагаемой системы контроля параметров ЛЭП 6–10 кВ позволит снизить операционные риски и трудоёмкость обслуживания, повышая наблюдаемость распределительных сетей.

Описание системы контроля параметров ЛЭП 6–10 кВ при помощи системы бесконтактных датчиков. Система бесконтактного мониторинга режимов работы ЛЭП 6–10 кВ предназначена для мониторинга режимов работы ЛЭП без гальванического подключения к фазным проводам. Контроль выполняется в ближней зоне проводов ЛЭП путём регистрации магнитной индукции и электрической напряжённости электромагнитного поля, формируемого токами и напряжениями трёх фаз ЛЭП. В качестве первичных преобразователей используются бесконтактные индуктивные и ёмкостные датчики.

Индуктивный канал системы мониторинга регистрирует изменение магнитной индукции электромагнитного поля, обусловленное протеканием токов промышленной частоты в проводах ЛЭП. При этом выходная величина сигнала индуктивных датчиков пропорциональна временной производной магнитного потока, сцепленного с катушкой индуктивности датчика.

Ёмкостный канал измеряет электрическую напряжённость электромагнитного поля, определяемую потенциалами фазных проводов ЛЭП. В силу суперпозиции полей сигнал каждого датчика представляет собой суммарный вклад всех расположенных в непосредственной близости от датчика проводников с током. При этом ориентация чувствительных осей датчиков и геометрия расположения проводников с током относительно датчика оказывают существенное влияние на амплитудно-фазовые характеристики регистрируемых сигналов.

Конфигурация системы контроля параметров ЛЭП 6–10 кВ предусматривает использование трёх индуктивных и трёх ёмкостных бесконтактных датчиков. Частота дискретизации сигналов бесконтактных датчиков составляет 3,2 кГц (0,0003125 с), что обеспечивает полную регистрацию сигналов, обусловленных протеканием токов промышленной частоты 50 Гц и токов высших гармоник до 32 порядка (1600 Гц).

Сигналы индуктивного и ёмкостного каналов усиливаются, оцифровываются и далее обрабатываются раздельно. В зависимости от требований к оперативности и ресурсам вычислительного узла алгоритмы обработки сигналов могут выполняться на борту прибора либо на внешнем сервере. Получаемый от прибора поток данных служит исходной информацией для методов контроля и диагностики режимов работы ЛЭП 6–10 кВ. Формат получаемых данных представлен в табл. 1.

Таблица 1. Фрагмент данных, получаемых от системы мониторинга ЛЭП 6–10 кВ

C1	C2	P1	P2	C3	P3
1615	1557	1399	1591	1577	1598
1614	1559	1400	1590	1578	1595
1612	1557	1403	1591	1577	1592
1614	1556	1397	1586	1577	1591
1611	1553	1395	1588	1574	1591
1613	1556	1397	1591	1574	1591
1613	1556	1392	1587	1578	1592
1615	1557	1395	1587	1578	1590
1615	1553	1398	1586	1575	1587

Поток данных представляется в виде табличного набора результатов цифровой обработки сигналов первичных преобразователей после АЦП (условные единицы АЦП с учётом коэффициентов аналогового усиления). Временная дискретизация данных составляет 3,2 кГц. Каждая строка соответствует одному отсчёту всех каналов в момент времени. Шесть столбцов таблицы содержат значения сигналов бесконтактных датчиков системы: столбцы C1, C2, C3 содержат значения сигналов

индуктивных датчиков. столбцы P1, P2, P3 – ёмкостных датчиков.

Графическое отображение фрагмента данных от системы мониторинга ЛЭП 6–10 кВ на временном интервале 0,25 с (≈ 12 периодов промышленной частоты) представлено на рис. 1. Можно заметить, что сигналы от каждого из датчиков системы имеют индивидуальные уровень, амплитуду, фазовый сдвиг и степень зашумленности.

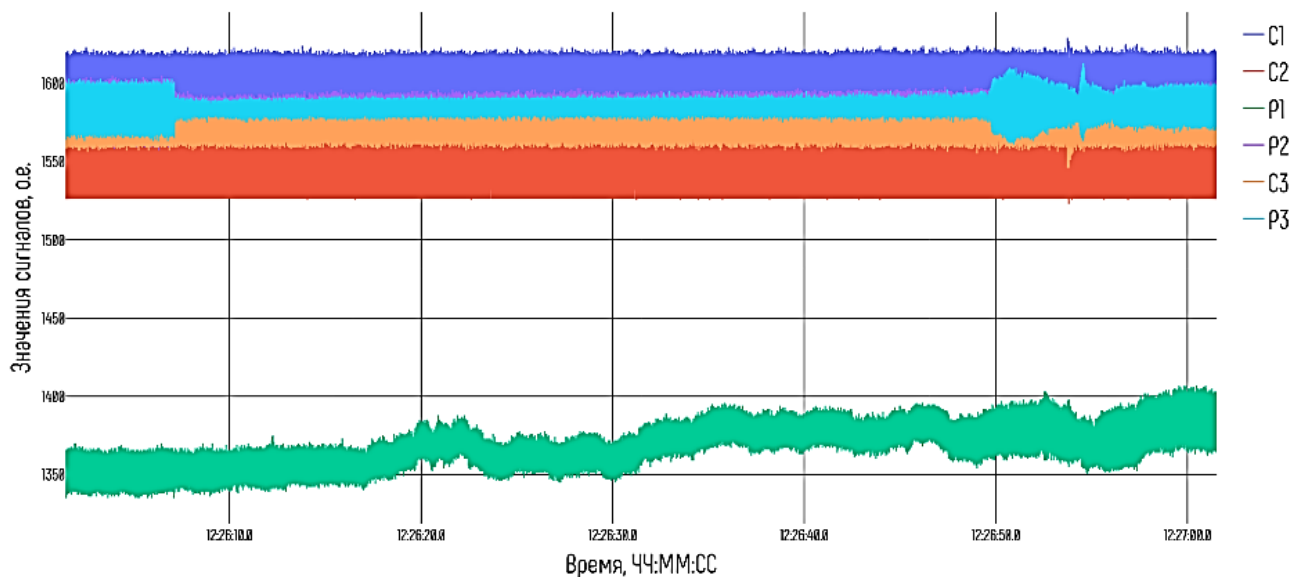


Рис. 1. Фрагмент данных от системы мониторинга ЛЭП 6–10 кВ

Различия в качестве (степени искажения/зашумленности) сигналов бесконтактных датчиков системы обусловлены ошибками в процессе работы АЦП и пространственным расположением датчиков. Кроме того, наличие в непосредственной близости от бесконтактных датчиков системы не только объекта контроля (проводов ЛЭП 6–10 кВ), но и проводов ЛЭП 0,4 кВ и линий связи, подвешенных ниже, чем располагается система мониторинга, оказывает негативное воздействие, снижая чистоту сигналов бесконтактных датчиков.

Ввиду физических принципов распространения и регистрирования магнитного и электрического полей, создаваемых проводниками, расположенными вблизи системы мониторинга, а также подсистемой питания, бесконтактные датчики воспринимают результирующее магнитное и электрическое поле от всех источников. Вышеописанные особенности функционирования системы мониторинга ЛЭП 6–10 кВ с бесконтактными датчиками магнитного и электрического поля снижают возможность прямой интерпретации сигналов, получаемых от системы мониторинга, и увеличивают трудоемкость их обработки.

Автоматизация процесса контроля ЛЭП 6–10 кВ при помощи методов анализа частотного спектра сигналов. Методы анализа частотного спектра относятся к универсальному инструментарию обработки сигналов, применимому в задачах диагностики электроэнергетических объектов, вибрационного мониторинга, радиотехники и телекоммуникаций. Их привлекательность обусловлена тем, что спектральные признаки непосредственно описывают распределение энергии сигнала по частотам, что удобно для выявления доминирующих гармоник, побочных полос, широкополосной помехи и дрейфа. Кроме того, спектральные показатели легко нормируются относительно частоты дискретизации и длины окна, что обеспечивает корректные сопоставления между сигналами датчиков системы и в разрезе различных измерительных экспериментов.

Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является работа с исходными данными измерительных каналов системы мониторинга. Алгоритм не требует фильтрации или специальной нормализации на входе, что упрощает воспроизводимость, снижает число настроечных параметров и сохраняет информативность первичных измерений.

1. Кратковременное преобразование Фурье (КВПФ)

Для каждого канала $x[n]$ вычисляется КВПФ с использованием прямоугольного окна с шириной $N_w = 256$ отсчетов и шагом скольжения $R = 64$ отсчета. Оконная функция $w[m]$ применяется к каждому фрагменту сигнала, после чего формируется матрица спектральных коэффициентов:

$$X_k[n] = \sum_{m=0}^{N_w-1} x[nR+m] \cdot w[m] \cdot e^{-j2\pi \frac{km}{N_w}}, \quad (1)$$

где $X_k[n]$ – комплексный спектральный коэффициент КВПФ; k -го бина на n -ом окне; $x[n]$ – дискретный сиг-

нал одного из беспроводных датчиков системы контроля; n – порядковый номер окна; $m = 0, \dots, N_w - 1$ – порядковый номер данных внутри окна; N_w – длина окна; R – шаг скольжения; $w[m]$ – оконная функция; $k = 0, \dots, N_w - 1$ – индекс частотного бина.

2. Расчёт энергии гармонической составляющей 50 Гц

Энергия гармоники 50 Гц на n -м временном шаге определяется как квадрат модуля соответствующего спектрального коэффициента:

$$E_{50}[n] = |X_{50}[n]|^2, \quad (2)$$

где E_{50} – энергия гармоники с частотой 50 Гц сигнала на n -ом окне; $X_{50}[n]$ – комплексный спектральный коэффициент КВПФ гармоники с частотой 50 Гц на n -ом окне; n – порядковый номер окна.

В качестве детерминированной метрики для определения события используется модуль изменения энергии гармоники 50 Гц, который определяется выражением:

$$\Delta E_{50}[n] = |E_{50}[n] - E_{50}[n-1]|, \quad (3)$$

где $\Delta E_{50}[n]$ – модуль изменения энергии гармоники с частотой 50 Гц сигнала на n -ом окне; E_{50} – энергия гармоники с частотой 50 Гц сигнала на n -ом окне; n – порядковый номер временного шага.

На основе данных об изменении энергии гармоники 50 Гц каждого датчика определяется интегральная метрика:

$$S[n] = \sum_{c=1}^C \Delta E_{50}^c[n], \quad (4)$$

где $S[n]$ – интегральная метрика оценки изменения энергии гармоники с частотой 50 Гц на n -ом окне; $\Delta E_{50}^c[n]$ – модуль изменения энергии гармоники с частотой 50 Гц сигнала датчика C на n -ом окне; C – индекс датчика в группе (индуктивные/емкостные).

3. Определение момента события

Время события t определяется по максимальному значению $\Delta E_{50}[n]$:

$$n^* = \underset{n}{\operatorname{argmax}} (S[n]), \quad (5)$$

$$t^* = \frac{n^* \cdot R}{f_s}, \quad (6)$$

где n^* – порядковый номер окна, для которого модуль изменения энергии гармоники с частотой 50 Гц оказался

наибольшим; $S[n]$ – интегральная метрика оценки изменения энергии гармоники с частотой 50 Гц на n -ом окне; t^* – момент времени наступления события, с; R – шаг скольжения; f – частота дискретизации сигнала, Гц.

Такое определение инвариантно к равномерным масштабным изменениям амплитуды и не требует пороговой настройки при достаточно выраженном событии.

4. Быстрое преобразование Фурье до и после события

В окрестности момента t формируются два фрагмента сигнала равной размерности ($N_w = 256$): «до» – $[t - \frac{N_w}{f_s}, t)$ и «после» – $[t, t + \frac{N_w}{f_s})$. Для каждого фраг-

мента вычисляется БПФ (с той же оконной функцией $w[m]$), с целью получения амплитудных спектров $|Y_{до}(f)|$ и $|Y_{после}(f)|$.

5. Анализ результатов БПФ «до» и «после»

Сопоставление $|Y_{до}(f)|$ и $|Y_{после}(f)|$ позволяет количественно оценить изменение амплитуды гармоники 50 Гц и высших гармоник каждого из сигналов. В многоканальной конфигурации результаты анализируются по каждому каналу; при необходимости формируются агрегированные оценки по подгруппам датчиков (индуктивные/ёмкостные) для повышения устойчивости интерпретации.

Графическая интерпретация описанного выше алгоритма представлена на рис. 2.

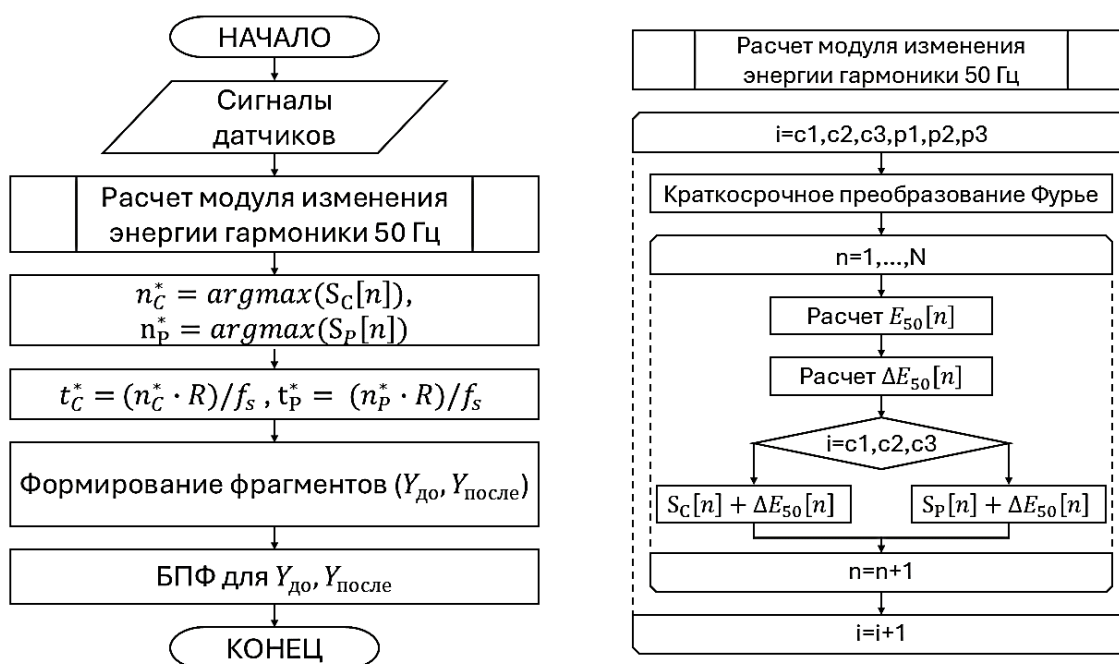


Рис. 2. Алгоритм обработки сигналов бесконтактных датчиков системы мониторинга ЛЭП 6–10 кВ

Использование КВПФ с параметрами $N_w = 256$, $R = 64$ обеспечивает баланс временного и частотного разрешений, достаточный для надежного выделения гармоники промышленной частоты (50 Гц) и регистрации кратковременных изменений её энергии. Метрика $\Delta E_{50}[n]$ обладает высокой чувствительностью к локальным событиям и инвариантностью к медленным вариациям амплитуды, что упрощает детекцию без предварительной фильтрации сигналов. Сопоставление спектров по БПФ до и после момента t даёт воспроизводимую основу для физической интерпретации изменений сигналов бесконтактных датчиков (усиление/ослабление основной гармоники, появление высших гармоник, рост шума) и их связи с режимными событиями ЛЭП.

Результаты обработки сигналов системы мониторинга при помощи предложенного алгоритма. Для тестирования предложенного алгоритма были прове-

дены испытания системы мониторинга в полевых условиях. В полевых условиях испытания производились в условиях изменения напряжения ЛЭП 10 кВ в пределах 1,5 % от номинального при переключении положения отпайки силового трансформатора 110/10 кВ. Переключение положения отпайки силового трансформатора 110/10 кВ производилось в момент времени 12:26:07.

Ниже представлены результаты обработки сигналов бесконтактных датчиков, согласно предложенному в предыдущем разделе алгоритму. На рис. 3 показаны результаты расчёта модуля изменения энергии гармонической составляющей 50 Гц для каждого из девяти сигналов бесконтактных датчиков. Вертикальные пунктирные линии отображают моменты события, определенные на основе агрегирования по группам датчиков (синяя линия – ёмкостные датчики, красная линия – индуктивные датчики).

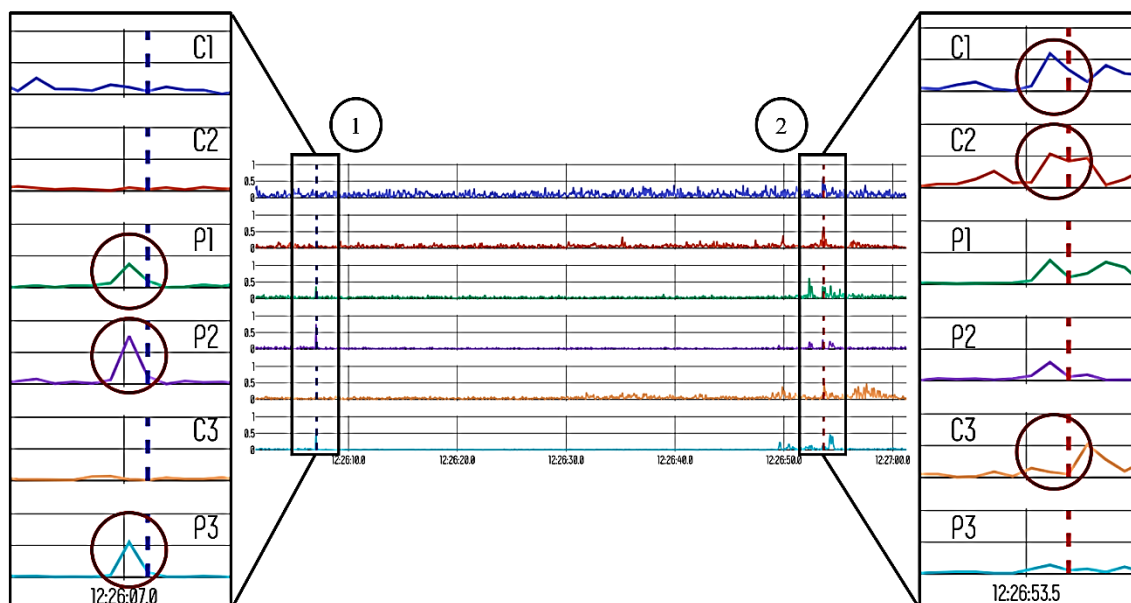


Рис. 3. Графики модуля изменения энергии гармоники 50 Гц сигнала для каждого датчика

Можно заметить, что детекция события в первом фрагменте была произведена на основе изменения энергии сигналом ёмкостных датчиков (P1, P2, P3), в то время как детекция события во втором фрагменте – результат изменения энергии сигналов индуктивных датчиков (C1, C2, C3).

На рис. 4–7 представлены результаты расчёта БПФ для фрагментов сигналов бесконтактных датчиков (C2 и P2) «до» и «после» определённых моментов события представлены на рис. 4–5 (для первого события) и рис. 6–7 (для второго события). На основании полученных при помощи БПФ результатов можно выделить ряд идентификаторов, на основании которых можно характеризовать произошедшее событие:

1. Характер и величина изменения амплитуды основной гармоники (50 Гц).
2. Изменения амплитуды отдельных высших гармоник (выбросы).
3. Соотношение изменения амплитуды чётных и нечётных высших гармоник.

4. Изменение коэффициента гармонических искажений (THD), характеризующего отношение среднеквадратического значения амплитуд высших гармоник к амплитуде основной гармоники.

Анализируя изменения характеристик для момента первого события (соответствующего моменту переключения отпайки силового трансформатора ПС 110/10 кВ) можно заметить, что изменение амплитуды основной гармоники ёмкостного датчика в десятки раз превышает изменение одноименной характеристики для индуктивного датчика.

Также отличаются частоты высших гармоник, по которым наблюдаются выбросы, качественные и количественные изменения амплитуд по группам гармоник (чётные/нечётные) и значения THD. Однако данные характеристики требуют дальнейшего изучения и интерпретации для их использования в качестве надёжных идентификаторов изменения параметров ЛЭП 6–10 кВ.

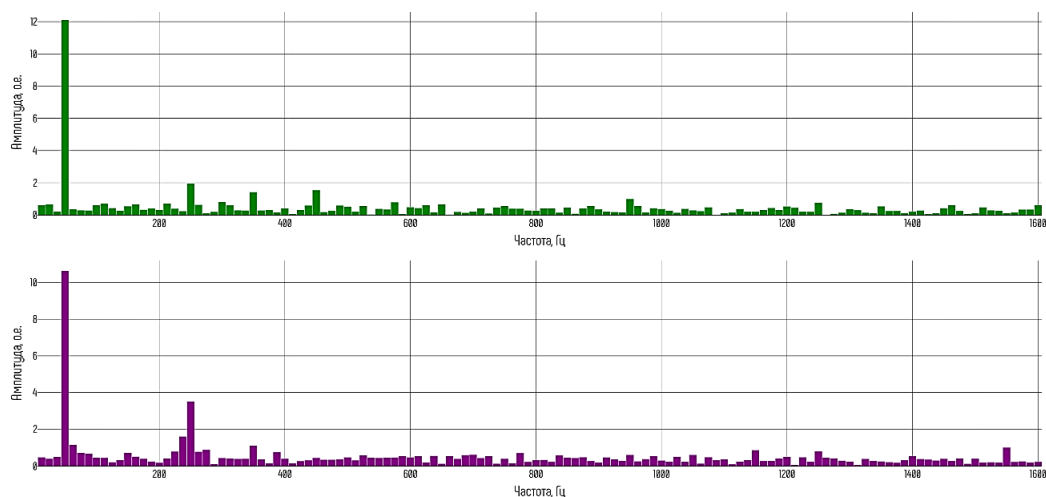


Рис. 4. Результаты БПФ для фрагментов сигнала индуктивного датчика C2 до (сверху) и после (снизу) момента первого события

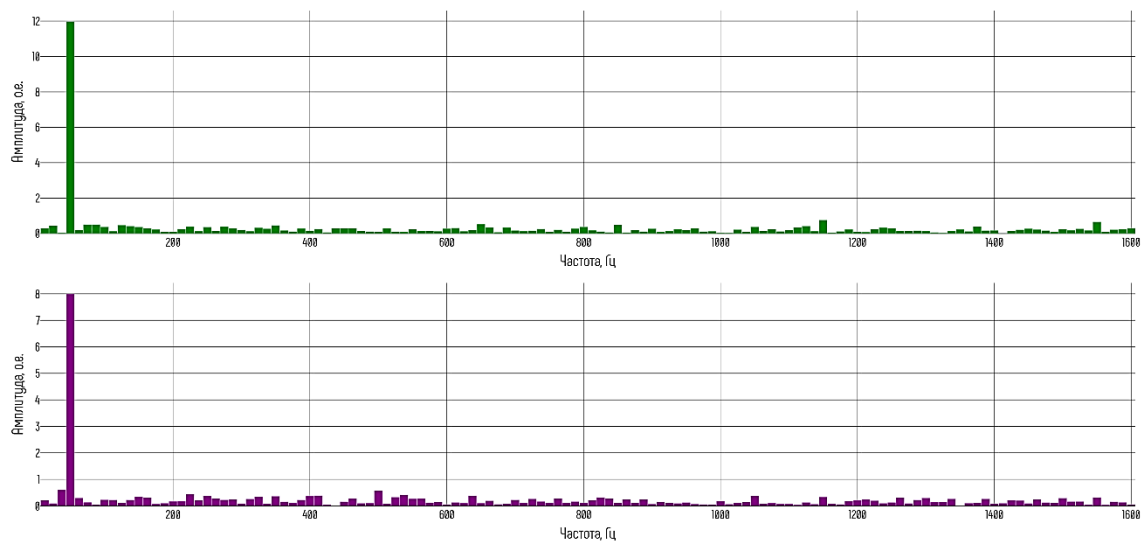


Рис. 5. Результаты БПФ для фрагментов сигнала емкостного датчика P2 до (сверху) и после (снизу) момента первого события

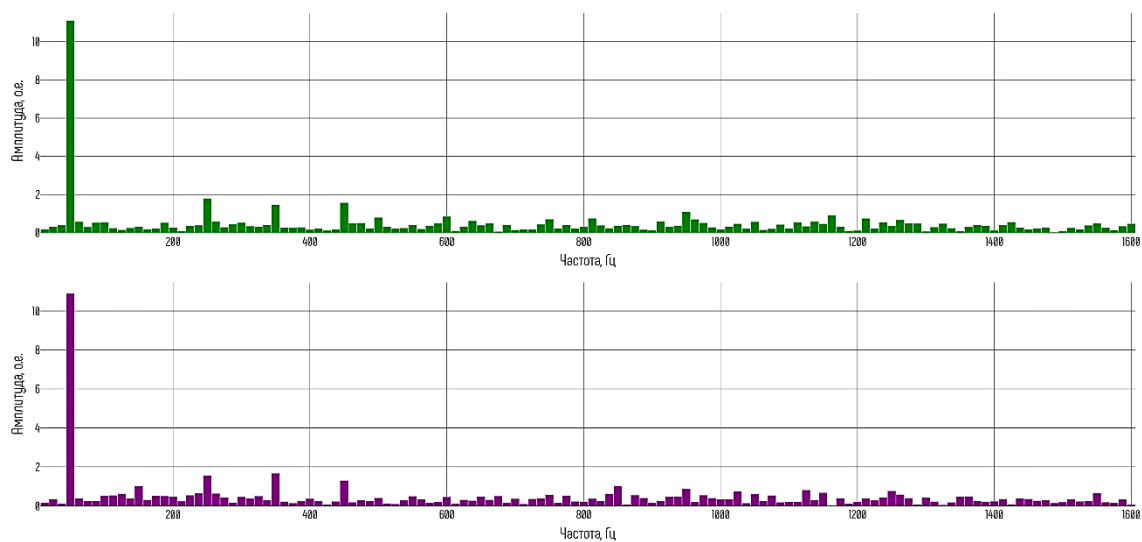


Рис. 6. Результаты БПФ для фрагментов сигнала индуктивного датчика C2 до (сверху) и после (снизу) момента второго события

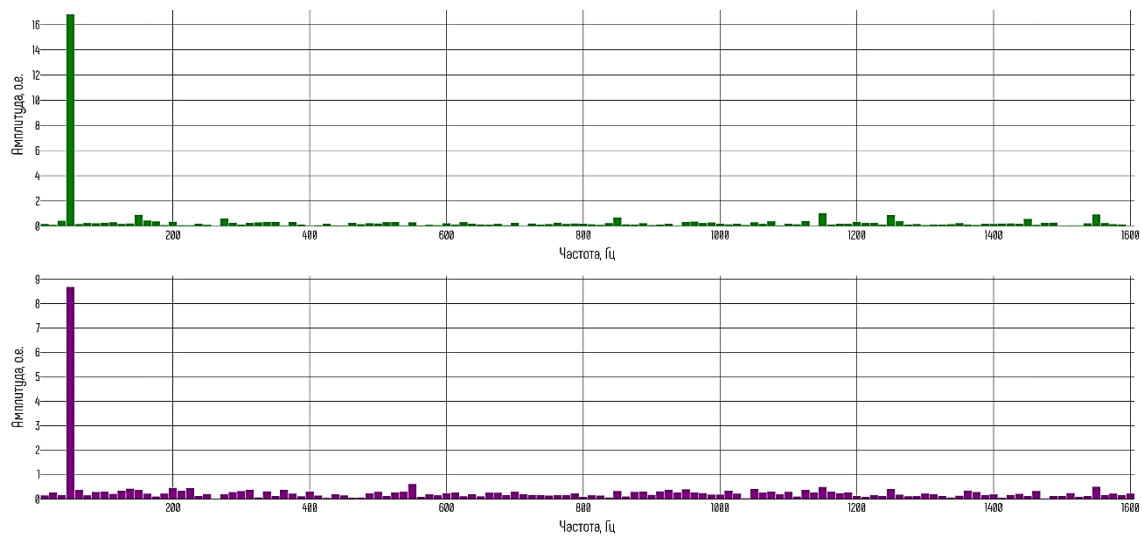


Рис. 7. Результаты БПФ для фрагментов сигнала ёмкостного датчика P2 до (сверху) и после (снизу) момента второго события

Заключение. В статье обоснована и экспериментально подтверждена применимость бесконтактного подхода к контролю параметров ЛЭП 6–10 кВ на основе регистрации электромагнитного поля и автоматизированной спектральной обработки сигналов. Методологическое ядро системы контроля составляет алгоритм, работающий с исходными данными без предварительной фильтрации. В рамках алгоритма осуществляется КВПФ (окно 256; шаг 64) для каждого канала, расчёт энергии гармоники 50 Гц и модуля её изменения, производится агрегирование по группам датчиков (индуктивные/ёмкостные), определение момента события по интегральной метрике, а затем сопоставление спектров «до/после» по БПФ для интерпретации изменений.

При тестировании на данных полевых испытаний алгоритм корректно выявил событие, причём детекция была обусловлена преимущественно реакцией ёмкостных каналов. Кроме того, было определено ещё одно событие – на основе индуктивных датчиков, что иллюстрирует комплементарность сенсорных групп и целесообразность их раздельного агрегирования.

Количественный анализ спектров «до/после» подтвердил различия в чувствительности типов датчиков к режимным изменениям: так, для первого события амплитуда основной гармоники у ёмкостного канала P2 снизилась на 48,4 % при одновременном росте отдельных высших гармоник (например, 1137,5 Гц – +1489,2 %),

тогда как у индуктивного C2 изменение основной гармоники составило лишь –1,9 % при «выбросе» на 675 Гц (+680,5 %); различалась и динамика THD.

Практическая значимость результатов состоит в том, что предложенная технология позволяет фиксировать и интерпретировать режимные события без гальванического подключения к токоведущим частям и без вывода линии из работы, а также обеспечивает детерминированную процедуру обнаружения (по максимуму интегральной метрики), пригодную для автоматизации.

Дальнейшие исследования будут проводиться в следующих направлениях:

- расширение набора испытаний с контролируемыми сценариями и эталонными измерениями для статистической валидации результатов алгоритма;
- уточнение геометрически-инвариантных признаков для устойчивой классификации событий (включая отношения чётных/нечётных гармоник и изменение THD);
- проработку процедур калибровки, учитывающих расположение датчиков и внешние источники поля;
- формирование полноценной методической базы диагностических индикаторов и переход к промышленному внедрению бесконтактного мониторинга на действующих ВЛ 6–10 кВ.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10315-П).

Литература

1. Данилов М.И. Алгоритм автоматизированного определения показателей надежности SAIDI и SAIFI по данным систем учета / М.И. Данилов, И.Г. Романенко, М.С. Демин [и др.] // *Электричество*. 2024. № 9. С. 60–69. DOI 10.24160/0013-5380-2024-9-60-69.
2. Коржов А.В. Анализ статистики технологических нарушений в кабельных распределительных сетях 6(10) кВ / А.В. Коржов, В.И. Сафонов, Р.М. Бабаев, Я.Е. Коростелев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2023. Т. 23. № 4. С. 5–13. DOI: 10.14529/power230401.
3. Старостин Е.С. Повышение надёжности распределительных сетей путём внедрения САВС и селективного АПВ // *Известия КГТУ*. 2024. № 73. С. 125–139. DOI 10.46845/1997-3071-2024-73-125-139.
4. Chen K.-L., Guo Y., Ma X. Contactless voltage sensor for overhead transmission lines // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018. Vol. 12. № 4. P. 957–966. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.1181.
5. Zhu K., Lee W. K., Pong P. W. T. Non-contact capacitive-coupling-based and magnetic-field-sensing-assisted technique for monitoring voltage of overhead power transmission lines // *IEEE Sensors Journal*. 2017. Vol. 17. № 4. P. 1069–1083. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2636862.
6. Xu Q., Liu X., Zhu K., Pong P.W. T., Liu C. Magnetic-Field-Sensing-Based Approach for Current Reconstruction, Sag Detection, and Inclination Detection for Overhead Transmission System // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2019. Vol. 55. № 7. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2905567.
7. Chen K.-L., Guo Y., Ma X., Pong P. W. T. Contactless current measurement for suspended overhead lines // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2024. DOI: 10.1049/gtd.2.13128.
8. Delle Femine A., Gallo D., Giordano D., Landi C., Luiso M. Low Power Contactless Voltage Sensor for Power Systems // *Sensors*. 2019. Vol. 19. № 16. DOI: 10.3390/s19163513.
9. Zhu K., Lee W. K., Pong P. W. T. Non-Contact Voltage Monitoring of HVDC Transmission Lines Based on Electromagnetic Fields // *IEEE Sensors Journal*. 2019. Vol. 19. № 8. P. 3121–3129. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2892498.
10. Колмогорова С.С. О возможности применения электроиндукционных датчиков в задаче нахождения местоположения источников электромагнитного поля в окружающей среде // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2024. № 12. С. 7–16. URL: <https://pribor.tgizd.ru/mount12year2024/23227> (дата обращения: 27.09.2025).
11. Булатов Ю.Н. Моделирование электромагнитного поля вблизи опоры высоковольтной линии электропередачи / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, Е.В. Воронина // *Системы. Методы. Технологии*. 2025. № 2(66). С. 61–69. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-2-61-69.
12. Булатов Ю.Н. Моделирование магнитного поля двухфазной ЛЭП, выполненной на основе СПЭ-кабелей и трансформаторов Скотта / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, Е.В. Воронина // *Системы. Методы. Технологии*. 2025. № 2(66). С. 50–60. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-2-50-60.
13. Eroshenko S.A., Bramm A.M., Haljasmaa K.I. Power Transmission Lines Modeling Using the Method of Phase Coordinates to Improve the Accuracy of their Technical State Assessment // *Proceedings of the 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russia*. 2025. P. 1380–1385. – DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10614993.
14. Bieñ A., et al. Optimal Sensor Placement for Contactless Medium-Voltage Overhead Lines Monitoring // *Energies*. – 2025. Vol. 18. № 18. DOI: 10.3390/en18184982.
15. Si W., Li M., Wang M., et al. Computational analysis of reconstructing current and sag of overhead transmission lines based on the magnetic field // *Open Physics*. 2023. – Vol. 21. № 1. DOI: 10.1515/phys-2023-0143.

16. Mozaffari M., Sarailoo M., Khalili A., et al. Real-Time Detection and Classification of Power Quality Disturbances in Power Delivery Systems // *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 21. DOI: 10.3390/s22218268.
17. Memon A.A., et al. Comprehensive review of power quality disturbance detection and classification using signal processing and pattern-recognition techniques // *Computers & Electrical Engineering*. 2025.
18. Priyadarshini M.S., Bajaj M., Prokop L., Berhanu M. Perception of power quality disturbances using Fourier, Short-Time Fourier, continuous and discrete wavelet transforms // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14.
19. Priyadarshini M.S., et al. Significance of Harmonic Filters by Computation of Short-Time Fourier Transform-Based Time-Frequency Representation of Supply Voltage // *Energies*. 2023. Vol. 16. № 5. DOI: 10.3390/en16052194.
20. Caicedo J.E., Agudelo-Martínez D., Rivas-Trujillo E., et al. A systematic review of real-time detection and classification of power quality disturbances // *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2023. Vol. 8. DOI: 10.1186/s41601-023-00277-y.
21. Hao X., Wang X., Lv S., et al. The Detection Algorithm Based on the Short Time Delay for Voltage Sag Detection // *Electronics*. 2022. Vol. 11. № 17. DOI: 10.3390/electronics11172646.
8. Delle Femine A., Gallo D., Giordano D., Landi C., Luiso M. Low Power Contactless Voltage Sensor for Power Systems // *Sensors*. 2019. Vol. 19. № 16. –DOI: 10.3390/s19163513.
9. Zhu K., Lee W. K., Pong P. W. T. Non-Contact Voltage Monitoring of HVDC Transmission Lines Based on Electromagnetic Fields // *IEEE Sensors Journal*. 2019. Vol. 19. № 8. P. 3121–3129. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2892498.
10. Kolmogorova S. S. Application of Electroinduction Sensors in the Task of Finding the Location of Electromagnetic Field Sources in the Environment // *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*. 2024. № 12. P. 7–16. DOI: 10.25791/pribor.12.2024.1543.
11. Bulatov Yu.N. Modeling of the electromagnetic field near a high-voltage power line support / Yu.N. Bulatov, A.V. Krukov, E.V. Voronina // *Systems Methods Technologies* 2025. № 2(66). P. 61–69. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-2-61-69.
12. Bulatov Yu. N. Modeling of the magnetic field of a two-phase power transmission line based on CLPE cables and Scott transformers / Yu.N. Bulatov, A.V. Krukov, E.V. Voronina // *Systems Methods Technologies*. 2025. № 2(66). P. 50–60. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-2-50-60.
13. Eroshenko S.A., Bramm A.M., Haljasmaa K.I. Power Transmission Lines Modeling Using the Method of Phase Coordinates to Improve the Accuracy of their Technical State Assessment // *Proceedings of the 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russia*. 2025. P. 1380–1385. DOI: 10.1109/EDM61683.2024.10614993.

References

1. Danilov M.I. Algorithm for automatic calculation of SAIDI and SAIFI reliability indices based on metering system data / M.I. Danilov, I.G. Romanenko, M.S. Demin, N.N. Konovalova, T.F. Morozova // *Elektrichestvo*. 2024. № 9. – P. 60–69. – DOI: 10.24160/0013-5380-2024-9-60-69.
2. Korzhov A.V. An analysis of the statistics of technological disruptions in a medium voltage cable distribution network / V.I. Safonov, R.M. Babayev, I.E. Korostelev // *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023. Vol. 23. № 4. P. 5–13. DOI: 10.14529/power230401.
3. Starostin E.D. Improving the reliability of distribution networks through the introduction of FLISR and selective ACR/ E.S. Starostin // *KSTU news*. 2024. № 73.P. 125–139. DOI 10.46845/1997-3071-2024-73-125–139.
4. Chen K.-L., Guo Y., Ma X. Contactless voltage sensor for overhead transmission lines // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018. Vol. 12. №. 4. P. 957–966. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.1181.
5. Zhu K., Lee W. K., Pong P. W. T. Non-contact capacitive-coupling-based and magnetic-field-sensing-assisted technique for monitoring voltage of overhead power transmission lines // *IEEE Sensors Journal*. 2017. Vol. 17. № 4. P. 1069–1083. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2636862.
6. Xu Q., Liu X., Zhu K., Pong P. W. T., Liu C. Magnetic-Field-Sensing-Based Approach for Current Reconstruction, Sag Detection, and Inclination Detection for Overhead Transmission System // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2019. Vol. 55. №. 7. DOI: 10.1109/TMAG.2019.2905567.
7. Chen K.-L., Guo Y., Ma X., Pong P. W. T. Contactless current measurement for suspended overhead lines // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2024. DOI: 10.1049/gtd2.13128.
14. Bieñ A. et al. Optimal Sensor Placement for Contactless Medium-Voltage Overhead Lines Monitoring // *Energies*. 2025. Vol. 18. № 18. DOI: 10.3390/en18184982.
15. Si W., Li M., Wang M. et al. Computational analysis of reconstructing current and sag of overhead transmission lines based on the magnetic field // *Open Physics*. 2023. Vol. 21. № 1. DOI: 10.1515/phys-2023-0143.
16. Mozaffari M., Sarailoo M., Khalili A., et al. Real-Time Detection and Classification of Power Quality Disturbances in Power Delivery Systems // *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 21. DOI: 10.3390/s22218268.
17. Memon A.A. et al. Comprehensive review of power quality disturbance detection and classification using signal processing and pattern-recognition techniques // *Computers & Electrical Engineering*. 2025.
18. Priyadarshini M.S., Bajaj M., Prokop L., Berhanu M. Perception of power quality disturbances using Fourier, Short-Time Fourier, continuous and discrete wavelet transforms // *Scientific Reports*. 2024. Vol 14.
19. Priyadarshini M.S. et al. Significance of Harmonic Filters by Computation of Short-Time Fourier Transform-Based Time-Frequency Representation of Supply Voltage // *Energies*. 2023. Vol 16. № 5. DOI: 10.3390/en16052194.
20. Caicedo J.E., Agudelo-Martínez D., Rivas-Trujillo E., et al. A systematic review of real-time detection and classification of power quality disturbances // *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2023. Vol 8. DOI: 10.1186/s41601-023-00277-y.
21. Hao X., Wang X., Lv S., et al. The Detection Algorithm Based on the Short Time Delay for Voltage Sag Detection // *Electronics*. 2022. Vol 11. № 17. DOI: 10.3390/electronics11172646.