

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ В УСЛОВИЯХ НИЗКОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**А.М. Брамм**, *am.bramm@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-1868-4389>  
**А.И. Хальясмаа**, *a.i.khaliasmaa@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-5327-6076>  
**С.Ф. Сарапулов**, *s.f.sarapulov@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-3388-1321>  
**В.П. Метельков**, *v.p.metelkov@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-5640-1637>  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

**Аннотация.** В работе исследована работоспособность системы бесконтактного контроля функционирования воздушных линий среднего напряжения, предназначенной для детектирования однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) по сигналам электромагнитного поля линии. Система включает два независимых измерительных канала: бесконтактные индуктивные датчики (регистрация магнитной составляющей поля) и бесконтактные емкостные датчики (регистрация электрической составляющей поля), а также программный алгоритм, выделяющий момент изменения режима по изменению энергии основной гармоники в сигналах датчиков. Экспериментальная проверка выполнена на лабораторной установке, моделирующей трехфазную воздушную линию с изолированной нейтралью. Показано, что ухудшение качества электроэнергии (рост ТНД по токам с 2,6–3,0 до 8,6–10,7 %) сопровождается резким снижением доли мощности 50 Гц в сигналах датчиков (с ~35 до ~0,45 %), что приводит к уменьшению числа срабатывающих датчиков и увеличению временной ошибки детекции. Вместе с тем в части опытов при низком качестве электроэнергии система сохраняет корректную детекцию моментов возникновения и отключения ОЗЗ, что подтверждает принципиальную применимость бесконтактного мониторинга в условиях нестационарной и несинусоидальной электрической среды и задает направления дальнейшего повышения устойчивости алгоритмов обработки.

**Ключевые слова:** бесконтактный контроль, воздушные линии электропередачи, ОЗЗ, качество электрической энергии, бесконтактные датчики электромагнитного поля

**Для цитирования:** Исследование системы бесконтактного контроля функционирования воздушных линий в условиях низкого качества электроэнергии / А.М. Брамм, А.И. Хальясмаа, С.Ф. Сарапулов, В.П. Метельков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2026. Т. 26, № 1. С. 24–31. DOI: 10.14529/power260103

Original article  
DOI: 10.14529/power260103

## STUDY ON A SYSTEM FOR CONTACTLESS CONTROL OF OVERHEAD LINES UNDER CONDITIONS OF LOW POWER QUALITY

**A.M. Bramm**, *am.bramm@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-1868-4389>  
**A.I. Khalyasmaa**, *a.i.khaliasmaa@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-5327-6076>  
**S.F. Sarapulov**, *s.f.sarapulov@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-3388-1321>  
**V.P. Metelkov**, *v.p.metelkov@urfu.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-5640-1637>  
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** This paper analyzes the performance of a contactless control system for medium-voltage overhead lines, designed to detect single-phase ground faults (SGFs) by analyzing electromagnetic field signals from the line. The system comprises two independent measurement channels: contactless inductive sensors (recording the magnetic component of the field), contactless capacitive sensors (recording the electric component of the field), and a software algorithm that detects the moment of mode change by the change in the energy of the fundamental harmonic in the sensor signals. Experimental verification is performed on a laboratory setup simulating a three-phase overhead line with an isolated neutral. The deterioration in power quality (an increase in current THD from 2.6–3.0 % to 8.6–10.7 %) is accompanied by a sharp decrease in 50 Hz power in the sensor signals (from ~35 % to ~0.45 %), which leads to a decrease in the number of sensors triggered and an increase in the detection time error. At the same time, in some experiments

under low power quality conditions, the system maintains correct detection of the fault inception and clearing instants, confirming the feasibility of the fundamental applicability of contactless monitoring in non-stationary and non-sinusoidal electrical environments and sets the direction for further improving the robustness of processing algorithms.

**Keywords:** contactless control, overhead transmission lines, SPGF, power quality, contactless electromagnetic field sensors

**For citation:** Bramm A.M., Khalyasmaa A.I., Sarapulov S.F., Metelkov V.P. Study on a system for contactless control of overhead lines under conditions of low power quality. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2026;26(1):24–31. (In Russ.) DOI: 10.14529/power260103

### Анализ состояния проблемы

Распределительные сети среднего напряжения 6–10 кВ в Российской Федерации характеризуются значительной протяженностью, разветвленной структурой, высокой долей воздушных линий и существенной долей оборудования с длительным сроком эксплуатации. Анализ надежности таких сетей показывает повышенную повреждаемость воздушных линий электропередачи (ЛЭП) и значительную продолжительность перерывов электроснабжения, что связывается с территориальной разобщенностью, изношенностью ЛЭП и коммутационной аппаратуры, а также ограниченной оснащенностью средствами мониторинга [1–3].

Наиболее характерным видом повреждений для сетей среднего напряжения являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Согласно современным обзорам по диагностике и прогнозированию отказов линий среднего и высокого напряжения, ОЗЗ относятся к наиболее частым и одновременно селективно трудновывяляемым повреждениям, особенно при высоком сопротивлении замыкания и в изолированных либо компенсированных сетях [4]. Это обуславливает необходимость применения непрерывных систем мониторинга токов и напряжений по всей длине линии, а не только на подстанционном уровне.

Современные распределительные сети функционируют в условиях роста доли нелинейных нагрузок и силовой электроники. Применение преобразователей частоты, ШИМ-приводов, инверторных источников и распределенной генерации приводит к появлению гармонических искажений, несимметрии фазных напряжений, фликера и нестационарных процессов [5].

Исследования критериев оценки качества электроэнергии в условиях несинусоидальности и несимметрии показали, что классические показатели режима могут существенно искажаться при наличии гармоник и асимметрии [6]. В распределительных сетях промышленного назначения мониторинг качества электроэнергии рассматривается как обязательный элемент обеспечения надежной работы оборудования, особенно при высокой доле преобразовательной техники [7]. Аналогичные выводы делаются для энергосистем с переменными режимами, например, интегрирующих ветровую генерацию, где колебания параметров сети требуют устойчивых систем раннего обнаружения возмущений [8].

Таким образом, электрическая среда сетей среднего напряжения представляет собой нестационарный и часто несинусоидальный процесс, в котором формируются токи и напряжения с усложненной спектральной структурой.

Современные системы мониторинга качества электроэнергии ориентированы на длительную регистрацию параметров с высокой частотой дискретизации и устойчивую работу в различных климатических и электрических условиях [9].

В то же время в литературе отмечается, что ухудшение качества электроэнергии может приводить к искажению показаний измерительных и защитных устройств, что требует отдельной экспериментальной оценки их корректности в таких условиях [10]. Обзоры по онлайн-мониторингу кабелей и линий электропередачи подчеркивают необходимость малоинвазивных систем, способных работать без вывода линии из эксплуатации и сохранять устойчивость к помехам [2, 11].

В российской практике описаны датчики тока и напряжения для мониторинга ЛЭП, интегрируемые с микропроцессорной обработкой сигналов и предназначенные для одновременного контроля режима и качества электроэнергии [12]. При этом подчеркивается необходимость дальнейших метрологических исследований и оценки устойчивости таких систем к различным режимным условиям.

Отдельное направление составляет мониторинг состояния линий на основе анализа потоков данных интеллектуальных счетчиков и других сетевых устройств. Показана возможность выявления однофазных и полных отключений на значительных протяженностях линий с применением методов машинного обучения [13]. Однако такие подходы не решают задачу физического контроля электромагнитных параметров линии.

Таким образом, анализ литературы показывает, что:

- детально исследованы вопросы надежности сетей среднего напряжения и характер повреждений, включая ОЗЗ [1];
- активно развиваются методы мониторинга качества электроэнергии в условиях нестационарности и несинусоидальности [5–9];
- рассматриваются контактные и бесконтактные решения для мониторинга линий электропередачи [11, 12];
- исследуется устойчивость измерительных систем к вариациям условий эксплуатации [9, 10].

Вместе с тем в опубликованных работах практически отсутствует системный анализ влияния ухудшенного качества электроэнергии на корректность функционирования бесконтактной системы мониторинга ЛЭП, основанной на регистрации магнитного и электрического полей. Поскольку такие системы регистрируют параметры, формируемые токами и напряжениями линии, искажения формы сигналов потенциально могут влиять на информативность диагностических признаков и устойчивость алгоритмов обработки.

Следовательно, актуальной научной задачей является исследование работоспособности бесконтактной системы мониторинга линий электропередачи в условиях различного качества электроэнергии – от близкого к синусоидальному режиму до режимов с выраженными гармоническими искажениями и несимметрией – и оценка сохранения диагностической чувствительности при варьировании параметров электрической среды.

### Система бесконтактного контроля функционирования ВЛ

Система бесконтактного контроля представляет собой аппаратно-программный комплекс для регистрации изменений режима работы ВЛ среднего напряжения без подключения к токоведущим частям. Комплекс включает первичные преобразователи, измерительный тракт с оцифровкой, синхронизацию времени и программные модули обработки, обеспечивающие выделение момента изменения режима.

В качестве первичных преобразователей используются два типа датчиков, формирующие не-

зависимые измерительные каналы: бесконтактный индуктивный датчик магнитной составляющей электромагнитного поля и бесконтактный емкостный датчик электрической составляющей. Индуктивный канал функционирует на основе закона Фарадея и формирует выходной сигнал при изменении магнитного потока, создаваемого током линии. Емкостный канал формирует сигнал при изменении электрического поля, обусловленного изменениями напряжения линии.

Программная часть комплекса основана на алгоритме детекции изменений режима работы ВЛ среднего напряжения (рис. 1), реализующем обработку сигналов каждого из датчиков по отдельности, и анализе изменения средней энергии основной гармоники этих сигналов.

Совместное использование магнитного и электрического каналов повышает наблюдаемость режима, комплементарность сигналов позволяет повысить устойчивость автоматического анализа к вариативности условий установки датчиков и внешним помехам.

### Описание проведенных экспериментов

Тестирование системы бесконтактного контроля проводилось при помощи лабораторной установки, повторяющей в габарите трехфазную воздушную линию распределительной сети среднего напряжения с изолированной нейтралью [14, 15].

В рамках экспериментов были смоделированы следующие режимы: возникновение ОЗЗ на фазе А, В, С на участке линии, расположенном до места установки бесконтактных датчиков; возникновение

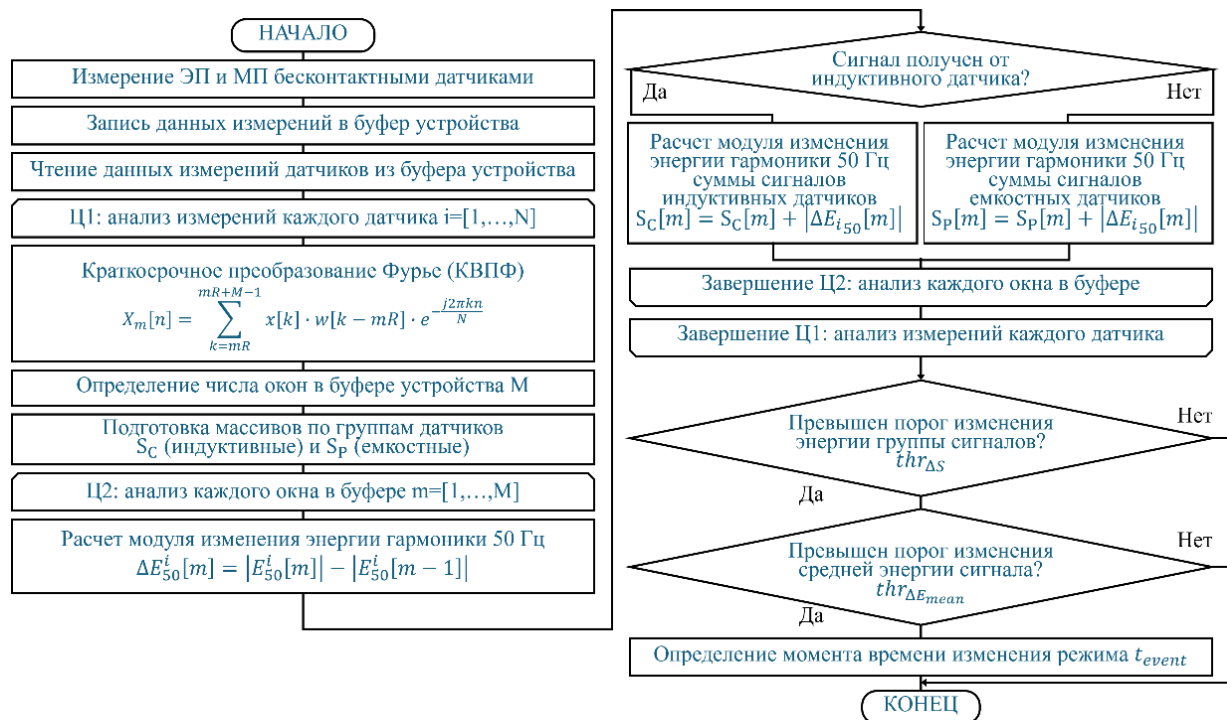


Рис. 1. Схема алгоритма обработки сигналов бесконтактных датчиков  
Fig. 1. Algorithm for processing non-contact sensor signals

ОЗЗ на фазе А, В, С на участке линии, расположенном после места установки бесконтактных датчиков. ОЗЗ воспроизводилось в течение 10–30 с, после чего отключалось. До и после появления ОЗЗ лабораторная установка находилась в нормальном режиме симметричной трехфазной нагрузки (1250 Вт на фазу).

В ходе экспериментов записывались осциллограммы фазных токов и напряжений при помощи измерительного прибора «Энерготестер ПКЭ». А также записывались сигналы бесконтактных датчиков системы бесконтактного контроля. Частота дискретизации измерений «Энерготестер ПКЭ» составляет 10 кГц, а частота записи сигналов бесконтактных датчиков – 3200 Гц. Для совместного анализа данные приводились к одной частоте дискретизации (3200 Гц).

При этом эксперименты повторялись в условиях различного качества электрической энергии внешней электрической сети.

Для оценки параметров качества электрической энергии рассчитывались следующие параметры (длина окна соответствует периоду промышленной частоты):

**среднеквадратичное значение для токов и напряжений:**

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N x^2[n]}, \quad (1)$$

где  $X_{\text{RMS}}$  – среднеквадратичное значение параметра;  $x[n]$  – значение анализируемого сигнала в окне;  $N$  – число точек сигнала в окне;

**коэффициент нелинейных искажений (ТНД) для токов и напряжений:**

$$\text{ТНД} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H A_h^2}}{A_1} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где ТНД – коэффициент нелинейных искажений сигнала, %;  $A_1$  – амплитуда основной гармоники сигнала;  $A_h$  – амплитуда  $h$ -й высшей гармоники.

Оценка зашумленности сигналов бесконтактных датчиков проводилась на основе доли мощности гармоники 50 Гц по отношению к высшим гармоникам для сигналов бесконтактных датчиков:

$$R_{50} = \frac{P_{[f_1 - \Delta f, f_1 + \Delta f]}}{P_{[0, f_{\text{max}}]}}, \quad (3)$$

где  $R_{50}$  – доля мощности основной гармоники, о. е.;  $P_{[f_a, f_b]}$  – спектральная мощность сигнала в полосе  $[f_a, f_b]$ .

$$P_{[f_a, f_b]} = \sum_{k: f_a \leq f_k \leq f_b} |X[k]|^2, \quad (4)$$

где  $X[k]$  – результат расчета быстрого преобразования Фурье в окне;  $f_k$  – частота анализируемой гармоники, Гц.

В табл. 1 приведено время возникновения ОЗЗ в ходе экспериментов.

На рис. 2, 3 представлены фрагменты сигналов бесконтактных датчиков и токов/напряжений лабораторной установки для двух блоков экспериментов.

В табл. 2 представлены усредненные результаты оценки качества электрической энергии для двух групп опытов.

Во втором блоке экспериментов наблюдается ухудшение качества электрической энергии. По оценке напряжений ТНД вырос примерно с 1,5–1,6 до 1,9–2,0 %, однако по оценке токов ТНД вырос с 2,6–3,0 до 8,6–10,7 % (в 3–4 раза). Для алгоритмов детекции, основанных на анализе спектральных признаков, такие изменения качества электрической энергии являются значительным

Таблица 1

Время возникновения ОЗЗ в ходе экспериментов

Table 1

Time of single-phase fault occurrence during experiments

№	Эксперимент	Время возникновения ОЗЗ	Время отключения ОЗЗ
Первый блок экспериментов			
1	ОЗЗ ф. А (до)	11:19:25,65	11:20:09,35
2	ОЗЗ ф. А (после)	11:28:55,58	11:29:25,65
3	ОЗЗ ф. В (до)	11:16:55,56	11:17:29,72
4	ОЗЗ ф. В (после)	11:26:55,40	11:27:25,96
5	ОЗЗ ф. С (до)	11:21:55,32	11:22:26,07
6	ОЗЗ ф. С (после)	11:24:55,81	11:25:24,95
Второй блок экспериментов			
1	ОЗЗ ф. А (до)	13:06:56,23	13:07:26,17
2	ОЗЗ ф. А (после)	12:56:36,15	12:56:58,16
3	ОЗЗ ф. В (до)	13:08:56,28	13:09:26,19
4	ОЗЗ ф. В (после)	12:58:26,64	12:58:56,26
5	ОЗЗ ф. С (до)	13:10:26,43	13:10:57,06
6	ОЗЗ ф. С (после)	13:00:28,29	13:00:56,46

негативным фактором – растет фон в спектре и ухудшается точность детекции.

При этом во втором блоке экспериментов доля мощности основной гармоники (50 Гц) сигнала

датчиков резко падает с 35 до 0,45 % (на основе медианной оценки по всем датчикам). Таким образом, полезная компонента сигнала «растворяется» на фоне спектральных искажений.

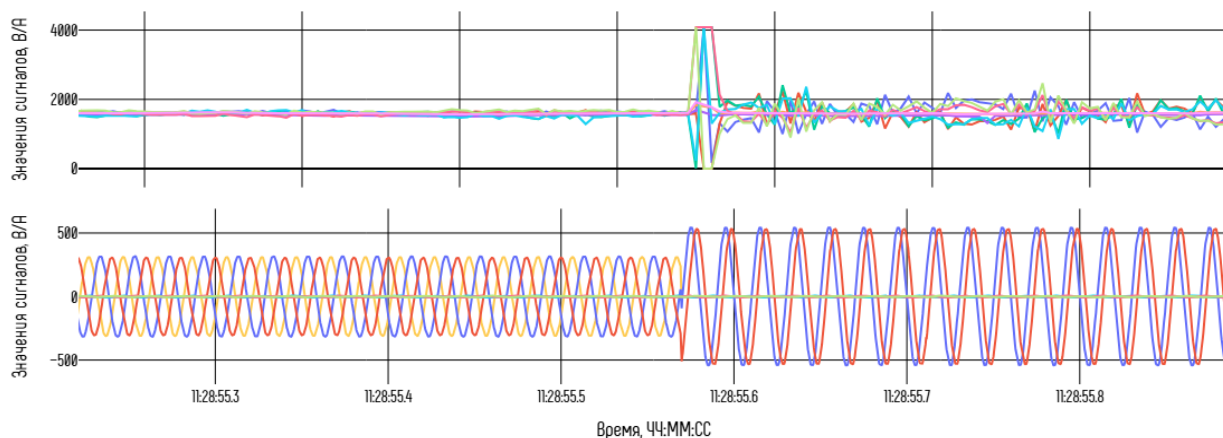


Рис. 2. Фрагмент сигналов из опыта № 2 первого блока (ОЗЗ ф. А после)  
Fig. 2. Signals fragments of the No. 2 experiment in the first group (phase A fault after the sensors)

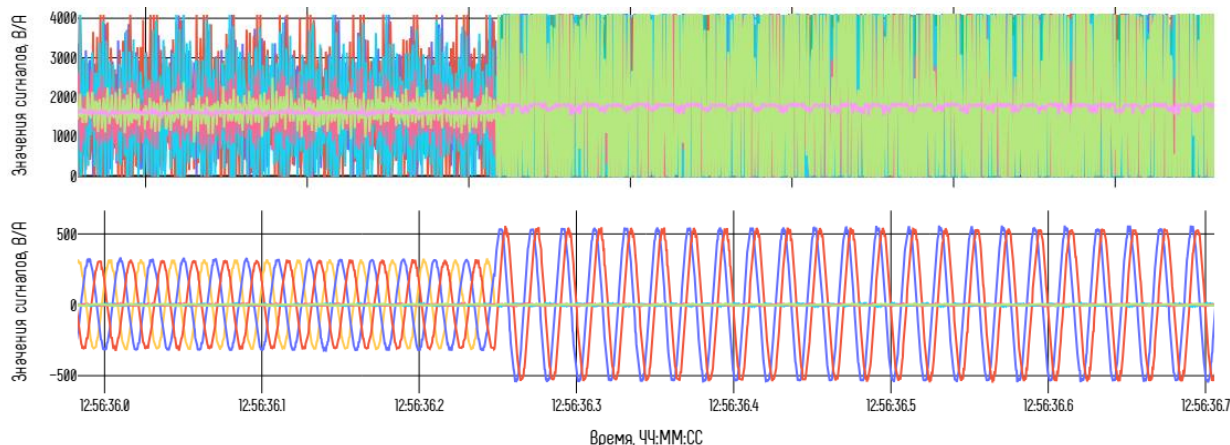


Рис. 3. Фрагмент сигналов из опыта № 2 второго блока (ОЗЗ ф. А после)  
Fig. 3. Signals fragments of the No. 2 experiment in the second group (phase A fault after the sensors)

Сравнение параметров качества электрической энергии в экспериментах

Таблица 2

Table 2

Comparison of power quality parameters during experiments

Параметр	RMS <sub>median</sub> , A	RMS <sub>median</sub> , B	THD <sub>median</sub> , %	THD <sub>95</sub> , %
Первый блок экспериментов				
I <sub>a</sub>	5,09	–	2,56	3,02
I <sub>b</sub>	5,22	–	2,69	3,22
I <sub>c</sub>	4,64	–	3,03	3,66
U <sub>a</sub>	–	220,15	1,52	1,91
U <sub>b</sub>	–	224,90	1,61	1,91
U <sub>c</sub>	–	216,83	1,54	1,82
Второй блок экспериментов				
I <sub>a</sub>	3,60	–	9,52	12,00
I <sub>b</sub>	3,66	–	8,56	10,91
I <sub>c</sub>	3,30	–	10,73	13,15
U <sub>a</sub>	–	219,08	1,94	2,29
U <sub>b</sub>	–	225,28	1,90	2,17
U <sub>c</sub>	–	218,24	1,94	2,30

Таблица 3

Результаты работы алгоритма определения ОЗЗ

Table 3

Results of the single-phase fault detection obtained using algorithm

№	Время возникновения ОЗЗ	Время, рассчитанное алгоритмом	Число сработавших датчиков	Время отключения ОЗЗ	Время, рассчитанное алгоритмом	Число сработавших датчиков
Первый блок экспериментов						
1	11:19:25,65	11:19:25,63	8/9	11:20:09,35	11:20:09,30	6/9
2	11:28:55,58	11:28:55,57	6/9	11:29:25,65	11:29:25,63	6/9
3	11:16:55,56	11:16:55,53	9/9	11:17:29,72	11:17:29,65	6/9
4	11:26:55,40	11:26:55,37	6/9	11:27:25,96	11:27:25,93	6/9
5	11:21:55,32	11:21:55,27	6/9	11:22:26,07	11:22:26,01	6/9
6	11:24:55,81	11:24:55,78	6/9	11:25:24,95	11:25:25,01	5/9
Второй блок экспериментов						
1	13:06:56,23	13:06:56,27	2/9	13:07:26,17	13:07:26,09	6/9
2	12:56:36,15	–	–	12:56:58,16	–	–
3	13:08:56,28	13:08:56,31	3/9	13:09:26,19	13:09:22,52	1/9
4	12:58:26,64	12:58:26,72	4/9	12:58:56,26	12:58:50,74	1/9
5	13:10:26,43	13:10:25,75	1/9	13:10:57,06	13:10:53,03	2/9
6	13:00:28,29	13:00:27,14	1/9	13:00:56,46	13:00:53,39	2/9

**Результаты работы алгоритма**

В табл. 3 представлены результаты работы алгоритма детекции ОЗЗ в ходе каждого из экспериментов.

В первом блоке экспериментов система бесконтактного контроля обрабатывает стабильно. Момент возникновения и отключения ОЗЗ определяется с малой погрешностью (как правило, на уровне сотых долей секунды), при этом срабатывает большинство датчиков (для возникновения ОЗЗ обычно 6–9 из 9, для отключения – 5–6 из 9).

Во втором блоке эффективность системы заметно ухудшается. Снижается число срабатывающих датчиков (для возникновения ОЗЗ фиксируются срабатывания 1–4 из 9. В эксперименте с ОЗЗ ф. А (после) алгоритм не определил срабатывание ни одного из датчиков. Также возрастает расхождение между реальным временем возникновения возмущения и временем, рассчитанным алгоритмом (в отдельных опытах ошибки достигают порядка 1 с и более по моменту возникновения и нескольких секунд по моменту отключения).

При этом система сохраняет корректную работу в существенной доле случаев даже при низком качестве электроэнергии: в 5 из 12 событий второго блока (41,7 %) алгоритм определил время возникновения и отключения ОЗЗ с ошибкой 0,03–0,08 с, сопоставимой с результатами работы в условиях работы без нарушения качества электроэнергии.

**Выводы**

По результатам, представленным в табл. 3 можно заключить, что предложенная система контроля функционирования ВЛ среднего напряжения, основанная на обработке сигналов бесконтактных индуктивных и емкостных датчиков, корректно определяет момент изменения режима (возникновения ОЗЗ) как в условиях нормативного качества электрической энергии, так и при нарушении качества энергии. Это подтверждает работоспособность системы детектирования возмущений в условиях реальной эксплуатации под действием внешних шумов и искажением качества сигналов датчиков ввиду снижения качества электрической энергии на контролируемом участке сети.

Однако увеличение ошибок во времени определения изменения режима и возможных избыточных срабатываний при нарушении качества электрической энергии требуют дальнейшего развития данной системы.

В качестве одного из дальнейших направлений развития бесконтактной системы рассматривается исследование моделей классификации детектируемых изменений режима для того, чтобы повысить информативность и интерпретируемость срабатываний, а также снизить вероятность ложных срабатываний, в том числе в условиях низкого качества электроэнергии.

**Список литературы**

1. Наумов И.В., Карамов Д.Н. К вопросу о повреждаемости воздушных линий электропередачи в системах электроснабжения // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14, № 2. С. 92–99. DOI: 10.24223/1999-5555-2021-14-2-92-99
2. Брамм А.М., Хальясмаа А.И. Система бесконтактного контроля изменения режимов работы ЛЭП 6–10 кВ по сигналам электрического и магнитного полей // Автоматизация в промышленности. 2026. № 2. С. 35–42.

3. Басманов В.Г., Холманских В.М. Выбор периодичности оценки технического состояния воздушных линий 6–10 кВ по результатам статистических исследований их надежности // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 4 (48). С. 23–34. DOI: 10.5281/zenodo.4316637
4. A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Prognosis Techniques in High Voltage and Medium Voltage Electrical Power Lines / M. Bindi, M. Piccirilli, A. Luchetta, F. Grasso // *Energies*. 2023. Vol. 16. Id. 7317. DOI: 10.3390/en16217317
5. Karafotis P.A., Georgilakis P.S. Power quality monitoring and evaluation in power systems under non-stationary conditions using wavelet packet transform // *High Voltage*. 2019. Vol. 4, iss. 3. P. 186–196. DOI: 10.1049/hve.2019.0062
6. New power-quality assessment criteria for supply systems under unbalanced and nonsinusoidal conditions / A. Dell'Aquila, M. Marinelli, V. Monopoli, P. Zanchetta // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19, no. 3. P. 1284–1290. DOI: 10.1109/tpwr.2004.829928
7. Analysis of Power Quality Monitoring Methods in Industrial Distribution Systems: Understanding Different Monitoring Tools for Efficient and Proper Operation / F. Choudhury, M.V.V.S. Yalla, G. Rinaldi // *IEEE Industry Applications Magazine*. 2025. Vol. 31, no. 5. P. 41–50. DOI: 10.1109/mias.2025.3576519
8. Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: A review / H. Shao, R. Henriques, H. Morais, E. Tedeschi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 191. P. 114094. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114094
9. Power quality monitoring system under different environmental and electric conditions / D. Elvira-Ortiz, R. Osornio-Ríos, D. Moriñigo-Sotelo et al. // *Proceedings of the 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. Ljubljana, Slovenia, 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICHQP.2018.8378846
10. Electrical measurements issue under deteriorated power quality conditions / M. Brodzicki, M. Klebba, A. Fracz, A. Klebba // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2025. DOI: 10.15199/48.2025.09.14
11. Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: A review / Y. Song, W. Chen, F. Wan et al. // *Electric Power Systems Research*. 2022. Vol. 210. P. 108140. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.108140
12. Polyakov D.A., Pugach V.N., Nikitin K.I. Power Transmission Lines Monitoring System // *Proceedings of the 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Moscow, Russia, 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/icieam.2018.8728674
13. Power Line Monitoring through Data Integrity Analysis with Q-Learning Based Data Analysis Network / R. Maskeliūnas, R. Pomarnacki, V. Huynh et al. // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 15 (1). Id. 194. DOI: 10.3390/rs15010194
14. The Laboratory Testing of Non-Contact Sensors System for Monitoring the Operating Modes of Overhead Power Transmission Lines / A. Bramm, S.A. Eroshenko, P.E. Storozeva, I.N. Storozev // *2025 IEEE XVII International Scientific and Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. Novosibirsk, Russian Federation, 2025. P. 1–6. DOI: 10.1109/APEIE66761.2025.11289368
15. Non-Contact Sensors System Application for Monitoring the Operating Modes of Overhead Power Transmission Lines / A. Bramm, S.A. Eroshenko, P.E. Storozeva, I.N. Storozev // *2025 IEEE XVII International Scientific and Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. Novosibirsk, Russian Federation, 2025. P. 1–5. DOI: 10.1109/APEIE66761.2025.11289271

### References

1. Naumov I.V., Karamov D.N. On damage rate of overhead power transmission lines in power supply systems. *Safety & Reliability of Power Industry*. 2021;14(2):92–99. (In Russ.) DOI: 10.24223/1999-5555-2021-14-2-92-99
2. Bramm A.M., Khalyasmaa A.I. Non-contact system for monitoring operating mode changes of 6–10 kV overhead lines based on electric and magnetic field signals. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2026;(2):35–42. (In Russ.)
3. Basmanov V.G., Kholmanskikh V.M. Selection of Frequency Estimation of 6–10 kV-Overhead Lines' Technical Condition Based on Reliability Statistical Studies. *Problems of the Regional Energetics*. 2020;4(48):23–34. (In Russ.) DOI: 10.5281/zenodo.4316637
4. Bindi M., Piccirilli M., Luchetta A., Grasso F. A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Prognosis Techniques in High Voltage and Medium Voltage Electrical Power Lines. *Energies*. 2023;16:7317. DOI: 10.3390/en16217317
5. Karafotis P.A., Georgilakis P.S. Power quality monitoring and evaluation in power systems under non-stationary conditions using wavelet packet transform. *High Voltage*. 2019;4(3):186–196. DOI: 10.1049/hve.2019.0062
6. Dell'Aquila A., Marinelli M., Monopoli V., Zanchetta P. New power-quality assessment criteria for supply systems under unbalanced and nonsinusoidal conditions. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004;19(3):1284–1290. DOI: 10.1109/tpwr.2004.829928
7. Choudhury F., Yalla M.V.V.S., Rinaldi G. Analysis of Power Quality Monitoring Methods in Industrial Distribution Systems: Understanding Different Monitoring Tools for Efficient and Proper Operation. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2025;31(5):41–50. DOI: 10.1109/mias.2025.3576519

8. Shao H., Henriques R., Morais H., Tedeschi E. Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024;191:114094. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114094
9. Elvira-Ortiz D., Osornio-Ríos R., Morínigo-Sotelo D., Rostro-Gonzalez H., Romero-Troncoso R. Power quality monitoring system under different environmental and electric conditions. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. Ljubljana, Slovenia, 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICHQP.2018.8378846
10. Brodzicki M., Klebba M., Fracz A., Klebba A. Electrical measurements issue under deteriorated power quality conditions. *Przeegląd Elektrotechniczny*. 2025. DOI: 10.15199/48.2025.09.14
11. Song Y., Chen W., Wan F. et al. Online multi-parameter sensing and condition assessment technology for power cables: A review. *Electric Power Systems Research*. 2022;210:108140. DOI: 10.1016/j.epr.2022.108140
12. Polyakov D.A., Pugach V.N., Nikitin K.I. Power Transmission Lines Monitoring System. In: *Proceedings of the 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Moscow, Russia, 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/icieam.2018.8728674
13. Maskeliūnas R., Pomarnacki R., Huynh V., Damaševičius R., Plonis D. Power Line Monitoring through Data Integrity Analysis with Q-Learning Based Data Analysis Network. *Remote Sensing*. 2022;15(1):194. DOI: 10.3390/rs15010194
14. Bramm A., Eroshenko S.A., Storozeva P.E., Storozev I.N. The Laboratory Testing of Non-Contact Sensors System for Monitoring the Operating Modes of Overhead Power Transmission Lines. In: *2025 IEEE XVII International Scientific and Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. Novosibirsk, Russian Federation, 2025. P. 1–6. DOI: 10.1109/APEIE66761.2025.11289368
15. Bramm A., Eroshenko S.A., Storozeva P.E., Storozev I.N. Non-Contact Sensors System Application for Monitoring the Operating Modes of Overhead Power Transmission Lines. In: *2025 IEEE XVII International Scientific and Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. Novosibirsk, Russian Federation, 2025. P. 1–5. DOI: 10.1109/APEIE66761.2025.11289271

#### **Информация об авторах**

**Брамм Андрей Михайлович**, младший научный сотрудник научной лаборатории цифровых двойников в электроэнергетике Уральского энергетического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; am.bramm@urfu.ru.

**Хальясмаа Александра Ильмаровна**, канд. техн. наук, доц., заведующий научной лабораторией цифровых двойников в электроэнергетике Уральского энергетического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;

**Сарапулов Сергей Федорович**, д-р техн. наук, профессор кафедры электротехники Уральского энергетического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; s.f.sarapulov@urfu.ru.

**Метельков Владимир Павлович**, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского энергетического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; v.p.metelkov@urfu.ru.

#### **Information about the authors**

**Andrey M. Bramm**, Junior Researcher at the Scientific Laboratory of Digital Twins in Electric Power Industry at the Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; am.bramm@urfu.ru.

**Alexandra I. Khalyasmaa**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Scientific Laboratory of Digital Twins in Electric Power Industry at the Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; a.i.khaliasmaa@urfu.ru.

**Sergey F. Sarapulov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Electrical Engineering at the Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; s.f.sarapulov@urfu.ru.

**Vladimir P. Metelkov**, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Electric Drives and Automation of Industrial Installations at the Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia; v.p.metelkov@urfu.ru.

*Статья поступила в редакцию 03.03.2026; одобрена после рецензирования 05.03.2026; принята к публикации 05.03.2026.*

*The article was submitted 03.03.2026; approved after review 05.03.2026; accepted for publication 05.03.2026.*