

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.317.353

EDN: FXXGAU

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-4-527-537



## Анализ высших гармоник напряжения на ранней стадии развития однофазных замыканий на землю в распределительных электрических сетях

И.Е. Кажекин<sup>1</sup>, Е.С. Старостин<sup>2</sup>✉<sup>1,2</sup>Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

**Резюме.** Цель – оценка возможности использования высших гармоник фазных напряжений в качестве средства для выявления однофазных замыканий на ранних стадиях их развития. В работе проведено исследование осцилограмм аварийных событий в распределительных сетях среднего напряжения Калининградской области. Осцилограммы получены с помощью автоматических пунктов секционирования воздушных линий (реклоузеров) за период с 2018 по 2023 г. Более чем из 2000 записанных осцилограмм были отобраны осцилограммы фазных напряжений, соответствующие постепенному развитию однофазного замыкания на землю. Данные осцилограммы были подвергнуты гармоническому анализу по алгоритму быстрого преобразования Фурье. На основе результатов анализа впервые показано, что устойчивый рост коэффициента третьей гармоники напряжения начинается за несколько периодов промышленной частоты до возникновения однофазного замыкания на землю. В ходе исследований выявлено, что уже за 200 мс до момента возникновения повреждения более чем в половине случаев происходит превышение коэффициентом третьей гармоники фазного напряжения значения, допустимого по стандарту качества электроэнергии. Начиная с 110 мс количество таких превышений достигает 75%. Выявленная закономерность может быть использована при совершенствовании защит от однофазных замыканий на землю и систем автоматического восстановления сети. Повышение третьей гармоники фазного напряжения может служить одним из ранних признаков формирования однофазного повреждения изоляции электросетевого оборудования и использоваться для превентивного запуска алгоритмов расчета локализации поврежденных участков сети в рамках построения адаптивных защит от однофазных замыканий на землю.

**Ключевые слова:** однофазные замыкания на землю, электрические сети, высшие гармоники, воздушные линии, среднее напряжение, осцилограммы, быстрое преобразование Фурье

**Для цитирования:** Кажекин И.Е., Старостин Е.С. Анализ высших гармоник напряжения на ранней стадии развития однофазных замыканий на землю в распределительных электрических сетях // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 4. С. 527–537. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-527-537>. EDN: FXXGAU.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Analysis of higher voltage harmonics at an early stages of single line-to-ground faults in electrical distribution grids

Ilya E. Kazhekin<sup>1</sup>, Egor S. Starostin<sup>2</sup>✉<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

**Abstract.** The study aimed to assess the feasibility of using higher phase voltage harmonics as a means of detecting single-phase faults at an early stage of their development. An analysis of oscillograms obtained during emergency events was carried out for the medium-voltage distribution grids of Kaliningrad Oblast. The oscillograms were obtained using reclosers for the period from 2018 to 2023. Out of over 2,000 recorded oscillograms, the phase voltage oscillograms corresponding to the gradual development of a single line-to-ground fault were selected. These oscillograms were harmonically analyzed using the fast Fourier transform algorithm. The results of this analysis showed that the third voltage harmonic distortion begins to increase steadily several industrial frequency cycles before the occurrence of a single line-to-ground fault. The study revealed that in over half of the cases, the third phase voltage harmonic distortion exceeds the value permitted by the power quality standard as early as 200 ms before the fault occurs. Starting from 110 ms, the number of such exceedances reaches 75%. The identified regularity can be used to improve automatic grid restoration

systems and protection against single line-to-ground faults. An increase in the third phase voltage harmonic can serve as one of the early signs of a single-phase insulation fault in power grid equipment and can be used to preventively run algorithms for localizing faulty grid sections as part of developing adaptive protection against single line-to-ground faults.

**Keywords:** single-phase ground faults, power grids, higher harmonics, overhead lines, medium voltage, waveforms, fast Fourier transform

**For citation:** Kazhekin I.E., Starostin E.S. Analysis of higher voltage harmonics at an early stages of single line-to-ground faults in electrical distribution grids. *iPolytech Journal*. 2025;29(4):527-537. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-4-527-537>. EDN: FXXGAU.

## ВВЕДЕНИЕ

Распределительные сети среднего напряжения характеризуются большой протяженностью линий электропередачи и высокой степенью их повреждаемости [1, 2]. Происходящие в них аварии являются причиной 70% всех нарушений электроснабжения потребителей [3]. Статистические данные показывают, что значительную долю (70–80%) от общего числа повреждений в электрических сетях составляют однофазные замыкания на землю (ОЗЗ).

Опасность ОЗЗ заключается в их потенциальном развитии в двух- и трехфазные короткие замыкания (КЗ). По результатам длительного наблюдения за распределительными сетями среднего напряжения было установлено, что до 20% ОЗЗ в воздушных линиях среднего напряжения могут перейти в двухфазные КЗ, а примерно 8% – в трехфазные [4]. Этому способствует то, что в большинстве случаев ОЗЗ не отключаются защитой и могут существовать достаточно длительное время. Все это время через место повреждения протекает ток замыкания, а при неустойчивом характере замыкания на изоляцию неповрежденных фаз действуют перенапряжения. В ряде работ отмечается повышение уровня высших гармоник (ВГ) при однофазном повреждении изоляции [5–12]. Однако при этом рассматриваются процессы лишь после значительного ухудшения состояния изоляции, констатируя, что ВГ способствуют дальнейшему развитию ОЗЗ в более опасные повреждения. Появление ВГ на ранних стадиях формирования замыкания, как правило, во внимание не принимается.

Между тем возникновение ВГ в электрической сети может быть рассмотрено как один из признаков развивающегося однофазного повреждения изоляции. Известные на сегодняшний момент методы, использу-

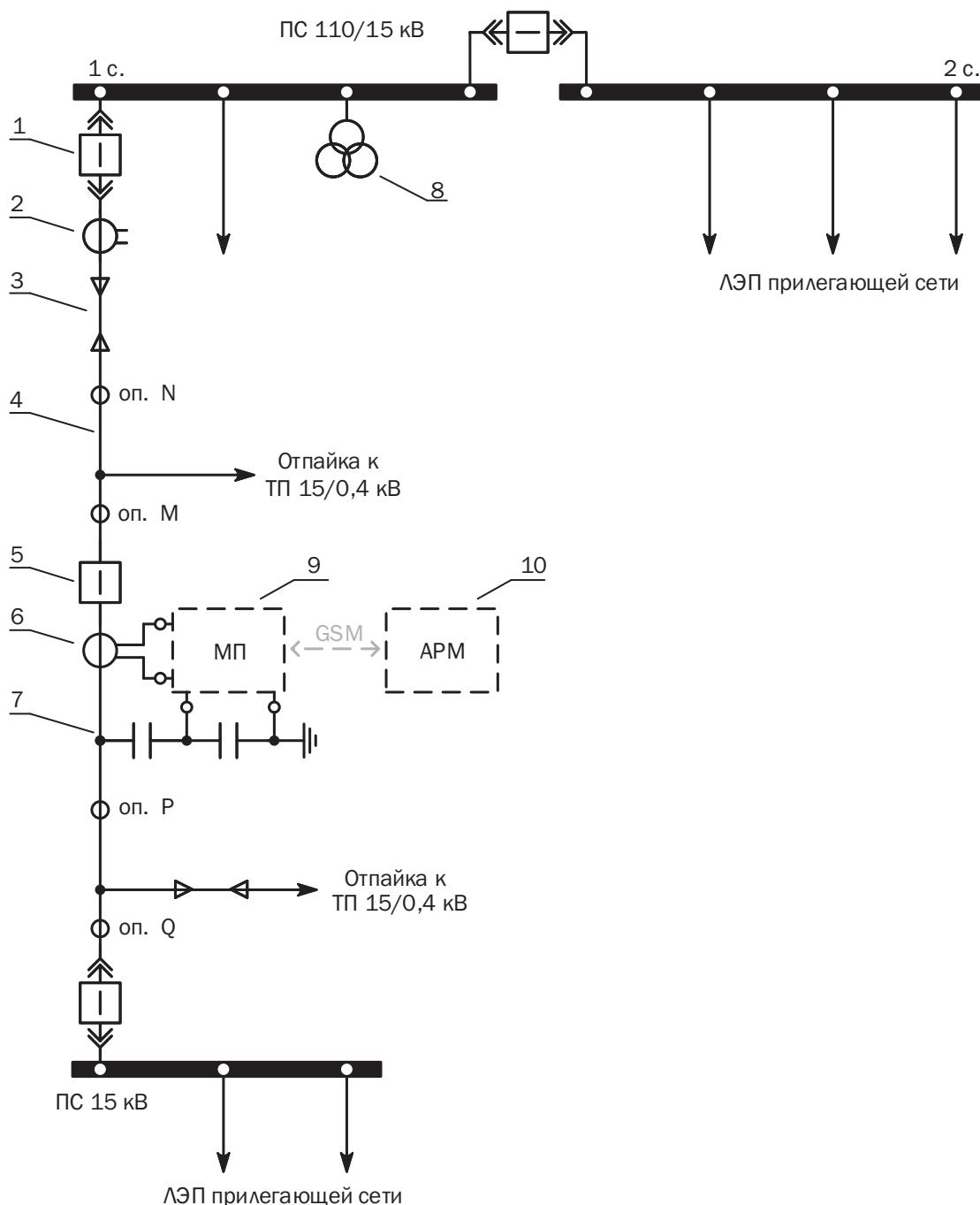
ющие ВГ в качестве диагностического признака ОЗЗ [13–17], способны решать лишь две задачи: оценку общего состояния изоляции электрической сети и поиск ее поврежденного участка. Развитие этих методов происходит по пути совершенствования как программно-аппаратных комплексов [17–21] для регистрации и анализа сигналов, так и самих методов обработки сигналов [22–26]. При этом практически не уделяется внимание процессам на ранней стадии развития повреждений, предшествующих ОЗЗ, во время которых также возможно возникновение ВГ.

Целью проведенной работы является оценка возможности использования ВГ как средства для выявления однофазных замыканий на ранних стадиях развития и прогнозирования состояния фазной изоляции электрической сети на основе данных, полученных в действующих электрических сетях.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для анализа динамики развития ВГ в режиме, предшествующем ОЗЗ, была использована база осцилограмм аварийных событий в распределительных сетях 15 кВ Калининградской области, работающих преимущественно в режиме резонансно-заземленной нейтрали с 2018 по 2023 г. [4]. Осцилограммы были получены с помощью автоматических пунктов секционирования воздушных линий (реклоузеров), установленных в распределительной сети среднего напряжения. На рис. 1 представлена обобщенная схема участка сети с установленным реклоузером.

На рис. 1 представлены следующие обозначения: 1 – линейный выключатель линии электропередачи (ЛЭП); 2 – трансформатор тока линейного выключателя, передающий данные в терминал релейной защиты и автоматики (РЗА) этого выключателя; 3 – кабельный участок ЛЭП; 4 – воздушный участок



**Рис. 1.** Обобщенная схема участка распределительной сети  
**Fig. 1.** Generalized diagram of the distribution network section

ЛЭП с отпайкой к потребительской трансформаторной подстанции (ТП); 5 – дистанционный выключатель; 6 – катушка Роговского; 7 – емкостной делитель напряжения; 8 – трансформатор напряжения; 9 – микропроцессорный терминал (МП); 10 – автоматизированное рабочее место (АРМ) работника электросетевой организации.

Алгоритмы терминала реклоузера позволяют при определенных возмущениях

в первичной цепи запускать процесс записи осцилограммы во внутреннюю память устройства. Длительность сохраняемых осцилограмм ограничена 1000 мс, а их количество – внутренней памятью устройства, при заполнении которой новые регистрации записываются вместо старых. В рассматриваемой электрической сети на 2018 г. было установлено 246 реклоузеров, к каждому из которых в ходе подготовки к

исследованию было осуществлено дистанционное подключение и проанализированы записанные на нем осциллограммы. В результате первичного анализа более чем из 2000 записанных осциллограмм была отобрана часть тех, на которых отображался процесс постепенного развития ОЗЗ. Общее описание исследуемых осциллограмм представлено в таблице.

Из таблицы видно, что не во всех случаях заметны значительные изменения среднеквадратичных значений фазных токов ЛЭП после возникновения ОЗЗ. Такая особенность связана с тем, что осциллограммы фазных токов в случае ОЗЗ между линейным выключателем ЛЭП и реклоузером (см. рис. 1) изменяются относительно нормального режима только на величину собственного емкостного тока ЛЭП, протекающего в сторону точки замыкания. Поэтому в анализе электрических параметров режима сети перед ОЗЗ в целях выявления признаков формирования таких повреждений на ранних стадиях были выбраны фазные напряжения как более надежный признак.

Длительность осциллограмм до момента ОЗЗ составляет от 6 до 40 периодов. Анализ производился путем выделения ВГ напряжения поврежденной фазы с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) [27].

Для применения БПФ осциллограммы были разбиты по периодам, каждый из которых соответствует 32 точкам. В таком случае результатом БПФ становятся значения

первых 15-ти гармоник. Каждый период от начала осциллограммы до момента ОЗЗ был разложен на гармоники с помощью БПФ. Тем самым обеспечена возможность анализа динамики изменения высших гармоник напряжений поврежденных фаз (до 15-й) во времени при приближении к моменту ОЗЗ.

С целью нормирования исследуемых гармоник их величины оценивались по коэффициенту гармонических составляющих:

$$K_{u(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} 100,$$

где  $U_{(n)}$  – амплитуда  $n$ -й гармоники напряжения, В;  $U_{(1)}$  – амплитуда первой гармоники напряжения, В.

Для оценки значимости искажений полученные значения коэффициентов гармонических составляющих сопоставлены с требованиями ГОСТ 32144-2013<sup>3</sup>. Стоит отметить, что требования стандарта направлены на оценку качества электроэнергии и должны сопоставляться со значениями коэффициентов гармонических составляющих напряжения, вычисленных как усредненное значение в интервале времени 10 мин. В проводимом исследовании осуществлялся анализ осциллограмм длительностью до 1000 мс, что не позволяет расценивать превышение указанных в стандарте значений как определение ненадлежащего качества электроэнергии.

#### Описание исследуемых осциллограмм

Description of the studied waveforms

№	Длительность осциллограммы, мс	Среднеквадратичное значение фазного тока по фазам, А						Среднеквадратичное значение фазного напряжения по фазам, кВ					
		до ОЗЗ			во время ОЗЗ			до ОЗЗ			во время ОЗЗ		
		А	В	С	А	В	С	А	В	С	А	В	С
1	555	31	20	23	175	12	23	13,8	4,7	3,3	1,1	10,7	13,2
2	600	4	4	4	8	4	7	12,2	6,5	6,7	15,6	0,3	15,7
3	1000	32	23	23	28	196	27	13,8	4,7	3,2	13,8	6,0	7,3
4	520	5	5	5	5	4	6	7,4	14,3	5,5	16,2	14,5	3,3
5	885	5	4	4	7	5	5	4,6	4,4	9,0	0,7	10,5	15,8
6	1000	35	33	66	51	48	67	4,4	3,8	8,0	5,1	1,1	10,8
7	1000	33	28	58	61	60	60	4,5	4,0	8,3	9,2	0,8	12,1
8	700	5	3	7	6	5	8	14,7	1,6	4,3	15,8	15,8	0,5
9	1000	15	7	11	9	6	7	9,4	4,7	6,3	11,2	1,7	8,8
10	1000	2	2	5	2	2	5	6,6	10,8	8,5	13,6	15,7	1,8
11	1000	13	8	19	13	10	18	5,1	4,2	9,2	13,0	11,4	2,7
12	1000	2	2	3	2	1,3	414	8,6	14,1	6,8	13,7	16,2	1,4

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2–5 представлены результаты анализа изменения высших гармоник фазного напряжения поврежденных фаз до момента ОЗЗ. Момент времени равный 0 с соответствует периоду осциллографии, в котором произошло ОЗЗ. Коэффициенты гармонических составляющих на каждом промежутке времени определены как среднее значение соответствующих коэффициентов всех исследуемых осциллографий. Красным цветом и маркерами выделены участки превышения коэффициентов над нормальными значениями в соответствии с ГОСТ<sup>3</sup>.

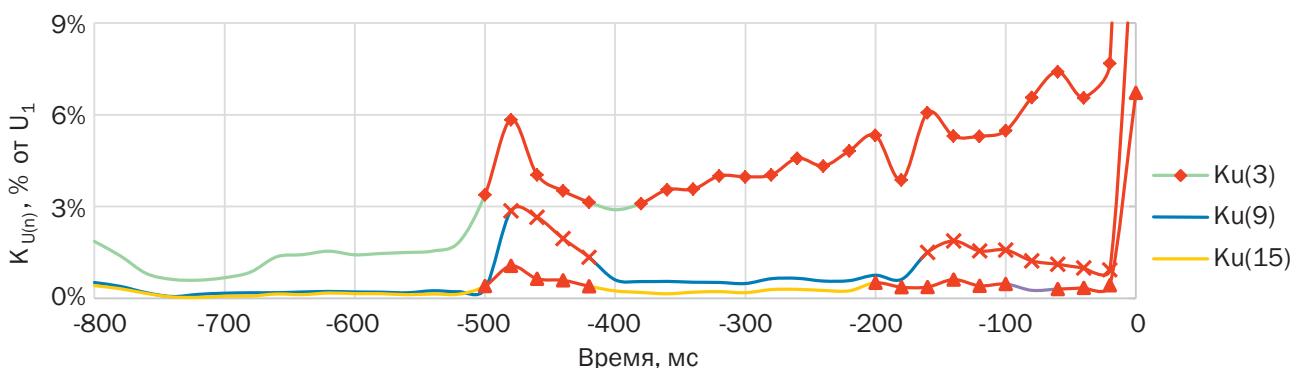
Как видно из рис. 2, наиболее информативным оказался коэффициент третьей гармоники. Его среднестатистическое значение превысило нормальное значение за 25 периодов до наступления момента ОЗЗ,

и вплоть до замыкания третья гармоника имела ярко выраженную тенденцию увеличения.

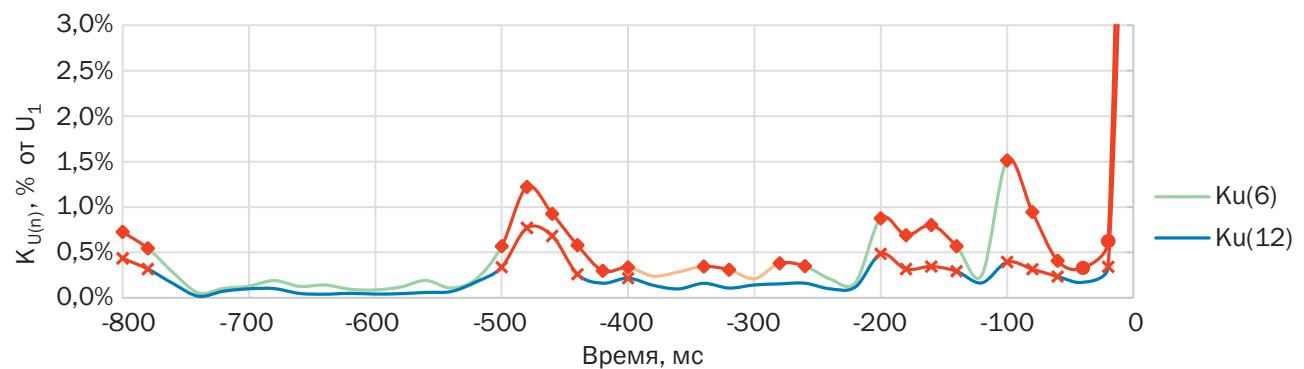
Из рис. 3 видно, что четные, кратные 3-м, гармоники не имели ярко выраженных трендов при приближении к моменту ОЗЗ. Однако для этих гармоник также характерно превышение уровней, допускаемых ГОСТ<sup>3</sup>.

На рис. 4 продемонстрировано, что коэффициенты гармонических составляющих фазного напряжения нечетных, некратных 3-м, гармоник превысили нормальные значения только в момент непосредственно ОЗЗ.

Зависимости, приведенные на рис. 5, показывают, что изменения четных гармоник, некратных 3-м, не сопровождаются стабильным превышением уровней, установленных ГОСТ<sup>3</sup>. Однако заметные возмущения коэффициентов этих гармоник возникли за 25 пе-

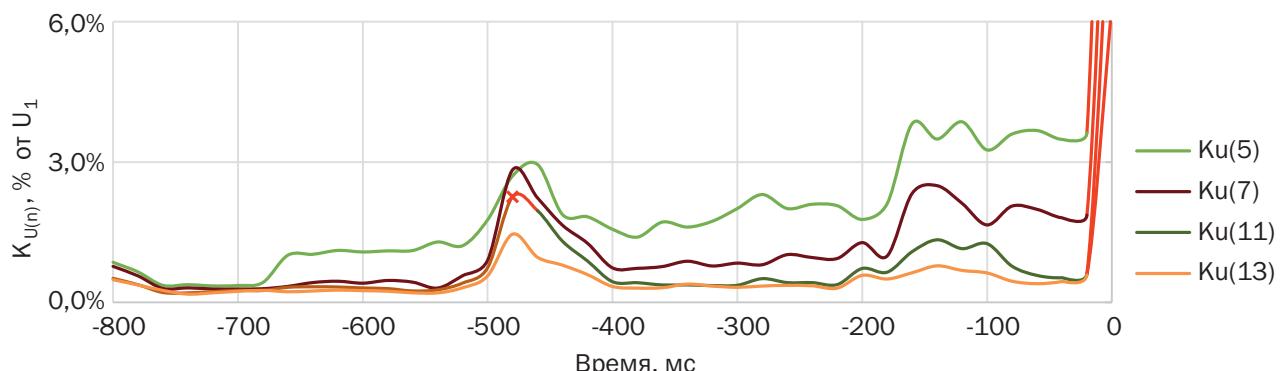


**Рис. 2.** График изменения коэффициентов гармонических составляющих фазного напряжения до момента возникновения однофазных замыканий на землю для нечетных гармоник, кратных 3-м  
**Fig. 2.** Graph of changes in harmonic component coefficients of line-to-ground voltage before the occurrence of single-phase ground faults for odd harmonics, multiples of 3



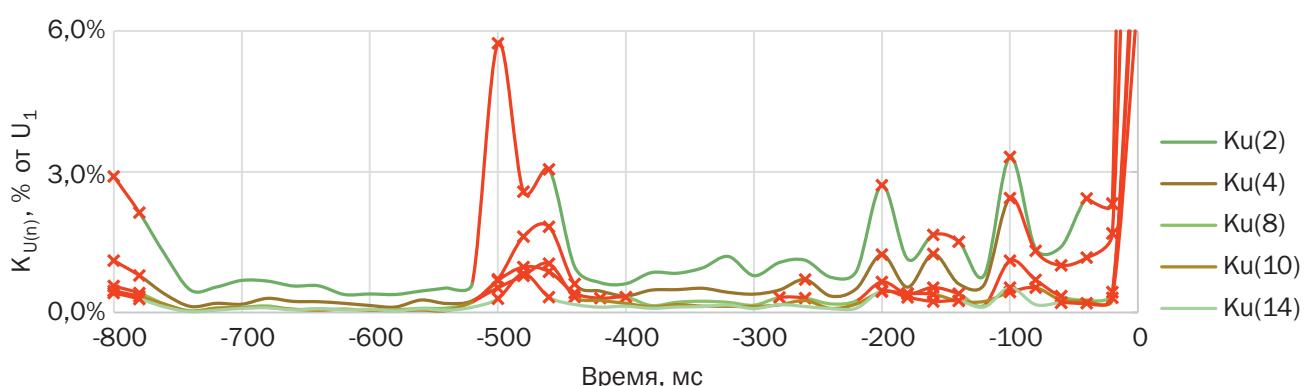
**Рис. 3.** График изменения коэффициентов гармонических составляющих фазного напряжения до момента возникновения однофазных замыканий на землю для четных гармоник, кратных 3-м  
**Fig. 3.** Graph of changes in harmonic component coefficients of line-to-ground voltage before the occurrence of single-phase ground faults for even harmonics, multiples of 3

<sup>3</sup>ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014.



**Рис. 4.** График изменения коэффициентов гармонических составляющих фазного напряжения до момента возникновения однофазных замыканий на землю для нечетных гармоник, некратных 3-м

**Fig. 4.** Graph of changes in harmonic component coefficients of line-to-ground voltage before the occurrence of single-phase ground faults for odd harmonics, not multiples of 3



**Рис. 5.** График изменения коэффициентов гармонических составляющих фазного напряжения до момента возникновения однофазных замыканий на землю для четных гармоник, некратных 3-м

**Fig. 5.** Graph of changes in harmonic component coefficients of line-to-ground voltage before the occurrence of single-phase ground faults for even harmonics, not multiples of 3

риодов до замыкания и участились к моменту его возникновения.

Наиболее информативным признаком наступающего пробоя изоляции является повышенный уровень третьей гармоники напряжения поврежденной фазы. В связи с этим важно оценить стабильность такого диагностического признака. На рис. 6 представлено сравнение графиков изменения третьей гармонической составляющей и нормы, определенной ГОСТ<sup>3</sup>, для каждой рассмотренной осциллограммы.

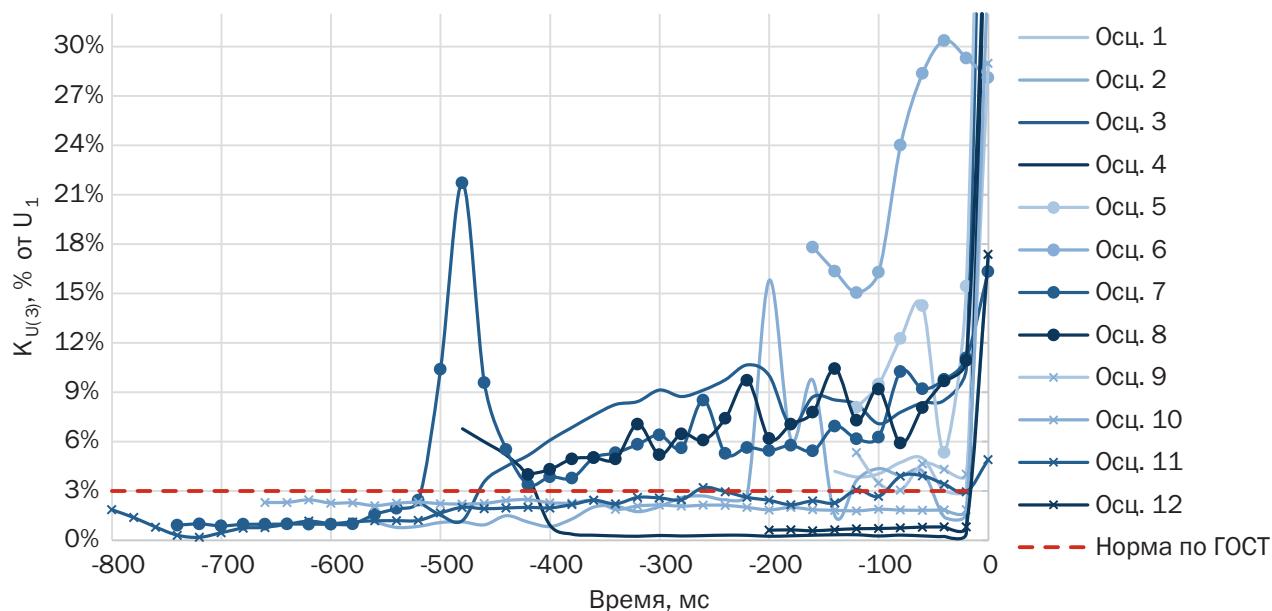
Из рис. 6 видно, что до момента наступления ОЗЗ в большинстве осциллограмм наблюдался стабильный рост коэффициента третьей гармонической составляющей фазного напряжения поврежденной фазы.

Начиная с 200 мс до момента возникновения замыкания, превышение 3-й гармоникой нормального значения происходит более чем в половине случаев, а со 110 мс количество превышений достигает 75%.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании было проанализировано изменение ВГ напряжений поврежденных фаз в предшествующий ОЗЗ момент в достаточно ограниченном промежутке времени, что обусловлено техническими возможностями средств регистрации. В этом диапазоне времени отмечен постепенный рост 3-й гармоники напряжения поврежденной фазы. Среди возможных причин такой закономерности видится формирование контура нулевой последовательности и насыщение нелинейных элементов электрической сети при постепенном развитии дефекта. Следует отметить, что для описанной обработки не использовались осциллограммы с ОЗЗ, вызванные внезапными внешними повреждениями.

Помимо описанных возможных причин повышения несинусоидальности фазных напряжений в диапазон времени, предшествующий ОЗЗ, источником ВГ может являться



**Рис. 6.** Графики изменения коэффициента третьей гармонической составляющей фазных напряжений каждой осциллограммы до момента возникновения однофазных замыканий на землю  
**Fig. 6.** Graphs of changes in the coefficient of the third harmonic component of line-to-ground voltages of each waveform before the occurrence of single-phase ground faults

также и нагрузка с преобладанием нелинейных элементов. В исследуемых электрических сетях достаточно высокие показатели качества электроэнергии, соответственно, фоновый уровень ВГ оказался низким и не повлиял на результаты исследования. Поэтому пороговые значения коэффициентов гармонических составляющих были выбраны с учетом ГОСТ<sup>3</sup>. В то же время известно, что в распределительных сетях промышленно развитых субъектов России суммарный коэффициент гармонических составляющих, связанных с током нагрузки, может достигать 20–30%.

Можно предположить, что на фоне имеющегося высокого уровня ВГ при постепенном развитии ОЗЗ в таких сетях будет наблюдаться еще большее искажение синусоидальности. Это следует учитывать при выборе пороговых значений реагирования защит, использующих выявленную закономерность. Пороговые значения должны быть адаптированы под специфику конкретной распределительной сети. Более длительное наблюдение за процессами в электрической сети до возникновения замыкания позволит не только установить значения ВГ, соответствующие началу процесса его формирования, но и оценить искажения синусоидальности фазных напряжений на ранних стадиях развития повреждения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые на основе анализа реальных осциллограмм показано, что за несколько периодов промышленной частоты до момента ОЗЗ начинается устойчивый рост коэффициента третьей гармоники напряжения поврежденной фазы, что может служить надежным диагностическим признаком для раннего обнаружения ОЗЗ.

Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании адаптивных защит и систем автоматического восстановления сети (САВС). Выявленные в результате проведенного исследования закономерности могут рассматриваться как один из признаков формирования однофазных повреждений изоляции электросетевого оборудования и использоваться при построении защит, направленных на определение неполных замыканий и ускорение работы САВС в целях превентивного запуска алгоритмов расчета локализации поврежденных участков сети. При этом для перестроения сети могут быть использованы дистанционные выключатели (реклоузеры). Для выбора пороговых значений с целью оценки роста коэффициента третьей гармонической составляющей фазного напряжения рекомендуется проводить анализ реальной сети, в которой планируется использовать результаты исследования.

**Список источников**

1. Лебедев В.Д., Филатова Г.А., Петров А.Е. Исследование цифровых измерительных трансформаторов в условиях дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю с применением программно-аппаратного комплекса RTDS // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024. Т. 24. № 2. С. 5–17. <https://doi.org/10.14529/power240201>. EDN: PUSOMM.
2. Коржов А.В., Сафонов В.И., Бабаев Р.М., Коростелев Я.Е. Оценка эффективности средств защиты от перенапряжений в кабельной распределительной сети 10 кВ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2024. Т. 24. № 2. С. 18–26. <https://doi.org/10.14529/power240202>. EDN: JCFEGG.
3. Наумов И.В., Полковская М.Н. Аналитическая оценка функционирования распределительных электрических сетей ПАО «Россети Волга» – «Оренбургэнерго» // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 17. № 8. С. 988–1006. EDN: XTMYHD.
4. Starostin E., Kazhekin I. Methodology for early prediction of single-phase ground faults in distribution networks // International Ural Conference on Electrical Power Engineering. 2024. Р. 72–76. <https://doi.org/10.1109/UralCon62137.2024.10718899>.
5. Шунин В.А., Винокурова Т.Ю., Шагурина Е.С. Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 6. С. 35–41. EDN: RRYZSX.
6. Kazhekin I.E., Finko S.P. Influence of non-linear load on single-phase fault current in electrical networks with isolated neutral // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Magnitogorsk, 23–25 September 2022). Magnitogorsk: IEEE, 2022. Р. 330–335. <https://doi.org/10.1109/UralCon54942.2022.9906778>.
7. Майоров А.В., Челазнов А.А., Ильиных М.В. Экспериментальные исследования переходных процессов при однофазных замыканиях в сети 20 кВ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 6. С. 23–29. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.6.023-029>. EDN: VBWLX.
8. Shirkovets A.I. Modeling of transient processes at ground faults in the electrical network with a high content of harmonics // 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (Matsue, 20–23 October 2013). Matsue: IEEE Computer Society, 2013. Р. 6804342. <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2013.6804342>. EDN: SLQEXH.
9. Тютиков В.В. Кутумов Ю.Д., Шадрикова Т.Ю., Шунин В.А. Условия полной компенсации токов однофазного замыкания на землю в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2022. № 5. С. 24–32. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2022.5.024-032>. EDN: YTQCQE.
10. Бурянина Н.С., Королюк Ю.Ф., Лесных Е.В., Суслов К.В. Определение места короткого замыкания на линиях электропередачи // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 6. С. 129–136. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-129-136>.
11. Аюурзана Э., Петров М.И., Кузьмин А.А. Экспериментальное исследование эффективности работы дугогасящих реакторов в Улан-Баторских городских электрических сетях 6–10 кВ // Вестник Чувашского университета. 2016. № 1. С. 30–38. EDN: VPZXJB.
12. Крюков А.В., Овчинин И.С. Моделирование однофазных замыканий на землю в технологических ЛЭП железнодорожного транспорта // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2025. № 1. С. 53–67. <https://doi.org/10.25729/ESI.2025.37.1.006>. EDN: IWCJCG.
13. Holcsik P., Pálfi J., Čonka Z., Bence K. I. Fault point location method, based on harmonics analysis of a distribution system // Acta Polytechnica Hungarica. 2022. Vol. 19. No. 4. Р. 147–164. <https://doi.org/10.12700/APH.19.4.2022.4.8>. EDN: FZMRWF.
14. Tong Ning, Liang Jihan, Li Hui, Lin Xiangning, Li Zhengtian. Single-phase earth fault location method based on harmonic analysis for the NUGS // Annual IEEE Systems Conference (Orlando, 18–21 April 2016). Orlando: IEEE, 2016. Р. 7490539. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2016.7490539>.
15. Fedotov A., Abdullazyanov R., Vagapov G., Grackova L. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (Riga, 13–14 October 2016). Riga: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. Vol. 57. Р. 7763116. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2016.7763116>. EDN: WINDWJ.
16. Farshad M., Sadeh J. Accurate single-phase fault location method for transmission lines based on k-nearest neighbor algorithm using one-end voltage // IEEE Transactions on Power Delivery. 2012. Vol. 27. Iss. 4. Р. 2360–2367. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2211898>.
17. Ощепков В.А. Разработка метода селективного определения отходящей линии и расстояния до места возникновения однофазного замыкания на землю // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. № 3. С. 127–135. <https://doi.org/10.18822/byusu202303127-135>. EDN: RHKYBD.
18. Li Yuan, Gao Houlei, Du Qiang, Qi Xiaosheng, Pang Qingle, Zhu Guofang. A review of single-phase-to-ground fault location methods in distribution networks // 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (Weihai, 6–9 July 2011). Weihai: IEEE, 2011. Р. 938–943. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2011.5994028>.

19. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдулмазянов А.Ф., Шаряпов А.М. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 146–155. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155>. EDN: WOLXFG.
20. Chen Jiaquan, Li Haifeng, Deng Chengjiang, Wang Gang. Detection of single-phase to ground faults in low-resistance grounded MV systems // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. Vol. 36. Iss. 3. P. 1499–1508. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3010165>.
21. Krasnykh A.A., Krivoshein I.L., Kozlov A.L. Research of single-phase faults in 6–35 kV branched overhead distribution network // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076252>.
22. Долгих Н.Н., Осипов Д.С., Парамзин А.О. Идентификация однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ на основе вейвлет-преобразования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 19. № 1. С. 139–146. <https://doi.org/10.18822/byusu202301139-146>. EDN: KUWHGM.
23. Парамзин А.О. Разработка способа селективного определения линии с однофазным замыканием на землю для промышленных сетей 6–35 кВ с изолированной нейтралью при преобладании несинусоидальной нагрузки // Омский научный вестник. 2023. № 4. С. 100–108. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-188-100-108>. EDN: WIUEEM.
24. Солдатов А.В., Кудряшова М.Н., Антонов В.И., Иванов Н.Г., Иванов М.О. Методы распознавания высших гармоник на фоне доминирующего гармонического шума для целей защиты от однофазного замыкания на землю // Электрические станции. 2021. № 7. С. 27–34. EDN: DCFFXI.
25. Дмитриченко В.И., Ни Д.А., Джетписов М.А., Бауржан Б. Комбинированная релейная защита от замыканий на землю в электросетях 6–10 кВ // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 53–69. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-53-69>.
26. Wang Yi Fei, Li Yun Wei. A grid fundamental and harmonic component detection method for single-phase systems // IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. Vol. 28. Iss. 5. P. 2204–2213. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2214445>.
27. Коровкин Н.В., Грицутенко С.С. О применимости быстрого преобразования Фурье для гармонического анализа несинусоидальных токов и напряжений // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 2. С. 73–86. EDN: WFFWIZ.

#### References

1. Lebedev V.D., Filatova G.A., Petrov A.E. The development of 6 kV network models for the study of digital instrument transformers with ARC intermittent single-phase ground faults. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2024;24(2):5-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power240201>. EDN: PUSOMM.
2. Korzhov A.V., Safonov V.I., Babayev R.M., Korostelev I.E. An assessment of the effectiveness of surge protection in a 10 kV cable distribution network. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2024;24(2):18-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power240202>. EDN: JCFCGG.
3. Naumov I.V., Polkovskaya M.N. Analytical assessment of the functioning of the distribution electric networks of PSJC Rosseti Volga – Orenburgenergo. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2024;17(8):988-1006. (In Russ.). EDN: XTMYHD.
4. Starostin E., Kazhekin I. Methodology for early prediction of single-phase ground faults in distribution networks. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2024;72-76. <https://doi.org/10.1109/UralCon62137.2024.10718899>.
5. Shuin V.A., Vinokurova T.Yu., Shagurina E.S. Mathematical model of calculating the minimum level of higher harmonics in line-to-ground fault current in 6–10 kV resonant earthed systems. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2013;6:35-41. (In Russ.). EDN: RRYZSX.
6. Kazhekin I.E., Finko S.P. Influence of non-linear load on single-phase fault current in electrical networks with isolated neutral. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering*. 23–25 September 2022, Magnitogorsk. Magnitogorsk: IEEE; 2022, p. 330-335. <https://doi.org/10.1109/UralCon54942.2022.9906778>.
7. Mayorov A.V., Chelaznov A.A., Ilyinykh M.V. Experimental study of transients under single-phase short circuits in the 20 kV network. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2015;6:23-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.6.023-029>. EDN: VBWLXL.
8. Shirkovets A.I. Modeling of transient processes at ground faults in the electrical network with a high content of harmonics. In: *2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology*. 20–23 October 2013, Matsue. Matsue: IEEE Computer Society; 2013, p. 6804342. <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2013.6804342>. EDN: SLQEXH.
9. Tyutikov V.V., Kutumov Y.D., Shadrikova T.Y., Shuin V.A. Terms and conditions of single phase to earth fault current full compensation in 6–10 kV cable networks with neutral point grounded via Arc suppression coil. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2022;5:24-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2022.5.024-032>. EDN: YTQCQE.
10. Buryanina N.S., Korolyuk Y.F., Lesnykh E.V., Suslov K.V. Determination of failure location in power transmission lines. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(6):129-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-129-136>.

11. Ayurzana E., Petrov M.I., Kuzmin A.A. Experimental study of performance Arc suppression coils at the UlaanBaatar city electric networks of 6-10 kV. *Bulletin of the Chuvash University*. 2016;1:30-38. (In Russ.). EDN: VPZXJB.
12. Kryukov A.V., Ovechkin I.S. Modeling modes of single-phase ground faults in technological power lines of railway transport. *Information and mathematical Technologies in Science and Management*. 2025;1:53-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.25729/ESI.2025.37.1.006>. EDN: IWCJCG.
13. Holcsik P., Pálfi J., Čonka Z., Bence K.I. Fault point location method, based on harmonics analysis of a distribution system. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2022;19(4):147-164. <https://doi.org/10.12700/APH.19.4.2022.4.8>. EDN: FZMRWF.
14. Tong Ning, Liang Jihan, Li Hui, Lin Xiangning, Li Zhengtian. Single-phase earth fault location method based on harmonic analysis for the NUGS. In: *Annual IEEE Systems Conference*. 18–21 April 2016, Orlando. Orlando: IEEE; 2016, p. 7490539. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2016.7490539>.
15. Fedotov A., Abdullazyanov R., Vagapov G., Grackova L. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance. In: *57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*. 13–14 October 2016, Riga. Riga: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2016, vol. 57, p. 7763116. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2016.7763116>. EDN: WINDWJ.
16. Farshad M., Sadeh J. Accurate single-phase fault-location method for transmission lines based on k-nearest neighbor algorithm using one-end voltage. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2012;27(4):2360-2367. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2211898>.
17. Oshchepkov V.A. Development of a method for selective determination of the outgoing line and the distance to the place of occurrence of a single-phase earth fault. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023;3:127-135. (In Russ.). <https://doi.org/10.18822/byusu202303127-135>. EDN: RHKYBD.
18. Li Yuan, Gao Houlei, Du Qiang, Qi Xiaosheng, Pang Qingle, Zhu Guofang. A review of single-phase-to-ground fault location methods in distribution networks. In: *4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. 6–9 July 2011, Weihai. Weihai: IEEE; 2011, p. 938-943. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2011.5994028>.
19. Fedotov A.I., Vagapov G.V., Abdullazyanov A.F., Sharyapov A.M. Digital power lines faults monitoring system. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021;23(1):146-155. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-146-155>. EDN: WOLXFG.
20. Chen Jiaquan, Li Haifeng, Deng Chengjiang, Wang Gang. Detection of single-phase to ground faults in low-resistance grounded MV systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021;36(3):1499-1508. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3010165>.
21. Krasnykh A.A., Krivoshein I.L., Kozlov A.L. Research of single-phase faults in 6–35 kV branched overhead distribution network. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076252>.
22. Dolgikh N.N., Osipov D.S., Paramzin A.O. Identification of single-phase ground fault in networks 6–35 kV using the wavelet transform. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023;19(1):139-146. (In Russ.). <https://doi.org/10.18822/byusu202301139-146>. EDN: KUWHGM.
23. Paramzin A.O. Development of selective line detection method with single-phase earth fault for industrial 6–35 kV networks with isolated neutral with non-sinusoidal load. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023;4:100-108. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-188-100-108>. EDN: WIUEEM.
24. Soldatov A.V., Kudryashova M.N., Antonov V.I., Ivanov N.G., Ivanov M.O. Methods for detecting higher harmonics against a background of dominant harmonic noise for the purpose of protection against single-phase ground faults. *Power Technology and Engineering*. 2021;7:27-34. (In Russ.). EDN: DCFFXI.
25. Dmitrichenko V.I., Ni D.A., Dzhetpisov M.A., Baurzhan B. Combined ground-fault relay protection in 6–10 kV power grids. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):53-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-53-69>.
26. Wang Yi Fei, Li Yun Wei. A grid fundamental and harmonic component detection method for single-phase systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013;28(5):2204-2213. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2214445>.
27. Korovkin N.V., Gritsutenko S.S. About applicability of the fast Fourier transform for a harmonic analysis of non sinusoidal currents and voltages. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*. 2017;2:73-86. (In Russ.). EDN: WFFWIZ.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Кажекин Илья Евгеньевич,

к.т.н.,  
доцент кафедры энергетики,  
Калининградский государственный  
технический университет,  
236022, г. Калининград,  
Советский проспект, 1, Россия  
kazhekin@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9510-5275>

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Ilya E. Kazhekin,

Cand. Sc. (Eng.),  
Associate Professor of the  
Department of Power Engineering,  
Kalininograd State Technical University,  
1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad 236022,  
Russia  
kazhekin@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9510-5275>

**Старостин Егор Сергеевич,**  
аспирант,  
Калининградский государственный  
технический университет,  
236022, г. Калининград,  
Советский проспект, 1, Россия  
✉ starostin-es@list.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-8439-514X>

**Egor S. Starostin,**  
Postgraduate Student,  
Kalininograd State Technical University,  
1 Sovetsky Prospekt, Kaliningrad 236022,  
Russia  
✉ starostin-es@list.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-8439-514X>

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Authors' contribution**

The authors contributed equally to this article.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 26.08.2025 г.; одобрена после рецензирования 03.10.2025 г.; принята к публикации 13.10.2025 г.

#### **Information about the article**

The article was submitted 26.08.2025; approved after reviewing 03.10.2025; accepted for publication 13.10.2025.