

Торайғыров университетінің хабаршысы  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Вестник Торайғыров университета

---

# Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия  
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

---

**№2 (2026)**

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**  
**Вестник Торайгыров университета**

**Энергетическая серия**  
выходит 4 раза в год

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

публикация материалов в области электроэнергетики,  
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и  
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

**Подписной индекс – 76136**

---

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

**Бас редакторы – главный редактор**

Талипов О. М.

*доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)*

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

**Редакция алқасы – Редакционная коллегия**

|                  |                                                 |
|------------------|-------------------------------------------------|
| Клецель М. Я.,   | <i>д.т.н., профессор</i>                        |
| Никифоров А. С., | <i>д.т.н., профессор</i>                        |
| Новожилов А. Н., | <i>д.т.н., профессор</i>                        |
| Алиферов А. И.,  | <i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i> |
| Кошеков К. Т.,   | <i>д.т.н., профессор</i>                        |
| Приходько Е. В., | <i>к.т.н., профессор</i>                        |
| Кислов А. П.,    | <i>к.т.н., доцент</i>                           |
| Нефтисов А. В.,  | <i>доктор PhD</i>                               |
| Шеръязов С. К.   | <i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i> |
| Искакова З. С.   | <i>технический редактор</i>                     |

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2128>**\*М. А. Джетписов<sup>1</sup>, С. К. Шерьязов<sup>2</sup>, К. Т. Тергемес<sup>3</sup>**<sup>1,3</sup>Алматинский Университет Энергетики и Связи

имени Гумарбека Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы;

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный аграрный университет,

Российская Федерация, г. Челябинск.

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6589-7352><sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-5114><sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4798-2817>\*e-mail: [jetspisovm@gmail.com](mailto:jetspisovm@gmail.com)

## **РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ**

*Статья посвящена разработке комбинированного метода обнаружения однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в распределительных электрических сетях 6–35 кВ, основанного на принципе анализа токов нулевой последовательности (НП). Проведены анализ существующих методов и средств релейной защиты от ОЗЗ и их основные недостатки, связанные с недостаточной чувствительностью защит при высоких переходных сопротивлениях и при дуговых перемежающихся замыканиях на землю. В работе предложен метод, основанный на совместном анализе амплитуды и фазового угла токов НП, позволяющий селективно определять зону возникновения ОЗЗ, на отходящем фидере или на сборных шинах подстанции. Показано, что для сетей с изолированной и компенсированной нейтралью угол между токами повреждённого и неповреждённых фидеров составляет около 180°, тогда как для сетей с резистивным заземлением нейтрали данный угол находится в пределах 135–150°. В связи с этим предложен принцип, учитывающий направление емкостных токов поврежденной и не поврежденных фаз. В работе введено новое понятие дифференциально-фазовый принцип анализа токов НП для обнаружения ОЗЗ и повышения надежности защиты. Дополнительно учитывается величина переходного сопротивления и амплитуда тока ОЗЗ, что позволяет*

*реализовать адаптивный принцип действия защиты с формированием сигнализации при высокоомных повреждениях и отключением при устойчивых низкоомных замыканиях. При разработке алгоритма защиты использованы результаты моделирования переходных процессов при ОЗЗ, выполненный в программной среде Matlab. Результаты исследования подтвердили повышение чувствительности, селективности и устойчивости работы защиты при переходных сопротивлениях до 10 кОм. Предложенный метод позволяет повысить надёжность электроснабжения, снизить риск повреждения электрооборудования, сократить эксплуатационные затраты и повысить безопасность оперативного персонала.*

*Ключевые слова: однофазное замыкание, изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль, резистивная нейтраль, переходное сопротивление, релейная защита, селективность, моделирование.*

## **Введение**

Значительная часть электрической энергии передаётся через распределительные сети напряжением 6–35 кВ, где наиболее распространённым повреждением являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). В сетях Казахстана применяются режимы с изолированной, компенсированной и резистивно-заземлённой нейтралью [1; 2; 3].

Несмотря на различия режимов заземления, общей проблемой остаётся недостаточная чувствительность существующих защит, особенно при ОЗЗ с переходным сопротивлением [4; 5; 6]. Длительное существование таких повреждений приводит к перенапряжениям, ускоренному старению изоляции, повреждению оборудования, развитию дуговых процессов, пожаров и феррорезонансных явлений [7; 8]. Поэтому надёжность и безопасность работы распределительных сетей напрямую зависят от эффективности своевременного обнаружения и селективного отключения ОЗЗ [4; 9; 10].

В настоящее время применяются различные методы защиты от ОЗЗ: защиты по напряжению и току нулевой последовательности, направленные и ненаправленные токовые защиты, методы по высшим гармоникам и другим дополнительным признакам. Однако существующие решения имеют ряд недостатков: снижение чувствительности при наличии переходного сопротивления, нестабильную работу при дуговых перемежающихся замыканиях, а также сложность реализации. Особенно затруднено обнаружение высокоомных ОЗЗ с переходным сопротивлением свыше 5 кОм.

Анализ режимов заземления нейтрали показывает, что информативным диагностическим признаком ОЗЗ является угол между токами повреждённой и неповреждённых фаз [9]. В сетях с изолированной и компенсированной нейтралью он составляет около  $180^\circ$ , а в сетях с резистивным заземлением –  $135\text{--}150^\circ$ . Учет направления и амплитуды токов нулевой последовательности позволяет повысить чувствительность и селективность защиты, а также обеспечить её устойчивую работу при дуговых перемежающихся замыканиях.

Таким образом, актуальной задачей является исследование переходных процессов при ОЗЗ и разработка эффективного метода их обнаружения и селективной защиты в распределительных сетях напряжением 6 (10)–35 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

### Материалы и методы

В ходе исследования проведён анализ существующих методов релейной защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ с различными режимами заземления нейтрали: изолированной, компенсированной, резистивно-заземлённой. Исследование выполнено с целью оценки чувствительности, селективности и надёжности современных защит при возникновении ОЗЗ, в том числе сопровождающихся переходным сопротивлением и дуговыми процессами.

В качестве основных методов используются защита от остаточного перенапряжения, ненаправленные и направленные токовые защиты нулевой последовательности, защиты по высшим гармоникам тока ОЗЗ, а также методы, использующие вброс индуктивного тока через заземляющий трансформатор [7; 8; 11]. Анализ выполнялся с учетом принципов действия защит, особенностей их применения в сетях среднего напряжения и оценки их работы в различных режимах замыкания.

Проведённый анализ показал, что общими недостатками современных методов защиты от ОЗЗ являются снижение чувствительности при больших переходных сопротивлениях, вероятность неселективного срабатывания при дуговых перемежающихся замыканиях, необходимость использования дополнительных измерительных сигналов и сложность реализации. Это подтверждает необходимость разработки более чувствительных и надёжных алгоритмов выявления ОЗЗ, обеспечивающих устойчивую работу в сетях с различными режимами заземления нейтрали.

При повреждении фазной изоляции ожидается ток ОЗЗ

$$I_{\text{ОЗЗ}} = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_\phi + R_C)^2 + X_C^2}} = \frac{U_\phi}{Z_C} \quad (1)$$

где  $I_{O33}$  – ток однофазного замыкания на землю, А

$U_\phi$  – фазное напряжение сети, В

$Z_C$  – полное сопротивление цепи «фаза–земля», Ом

$R_\Pi$  – переходное сопротивление в месте замыкания, Ом

$R_C$  – активное сопротивление изоляции относительно земли, Ом

$X_C$  – емкостное сопротивление сети относительно земли, Ом

Переходное сопротивление при ОЗЗ представляет собой эквивалентное сопротивление на пути протекания тока между повреждённой фазой и землёй. В распределительных сетях напряжением 6–35 кВ величина переходного сопротивления может изменяться в широком диапазоне – от единиц Ом до сотен кОм.

Наличие переходного сопротивления приводит к увеличению полного сопротивления цепи «фаза–земля», вследствие чего уменьшается ток ОЗЗ и изменяются его фазовые характеристики. Появление электрической дуги, сопротивление которой изменяется в процессе развития разряда и определяется степенью ионизации канала, существенно снижает чувствительность и селективность традиционных токовых защит нулевой последовательности, особенно при высокоомных и перемежающихся дуговых замыканиях. В результате усложняется определение места повреждения и повышаются требования к алгоритмам выявления ОЗЗ.

На практике неполные замыкания на землю показывают, что переходные сопротивления всего в несколько Ом могут привести к существенному снижению чувствительности и направленные токовые защиты от ОЗЗ демонстрируют несколько более высокую эффективность. Тем не менее, анализ показывает, что даже эти защиты показывают низкую селективность к ОЗЗ, когда переходные сопротивления достигают значений 3000–5000 Ом [12].

Таким образом, анализ данных показывает, что в большинстве случаев ОЗЗ происходит при переходном сопротивлении, которое находится в диапазоне от 0,02 до 200 кОм. Можно отметить, что:

- значительное количество повреждений имеют очень низкие переходные сопротивления, обычно ниже 0,1 кОм;
- еще один заметный кластер появляются при более высоких значениях сопротивления между 20 кОм и 400 кОм, с пиком около 200 кОм;
- очень мало ОЗЗ зафиксировано при промежуточных значениях сопротивления от 0,2 кОм до 10 кОм.

Такое распределение подтверждает случайный характер переходного сопротивления в ОЗЗ. Это также подчёркивает сложность для традиционных систем защиты: при низкоомных ОЗЗ, уровни тока ОЗЗ достаточные для определения токовыми защитами от ОЗЗ, в то время как высокоомные ОЗЗ

могут значительно снижать ток, что затрудняет надёжное определение и требует повышенной чувствительности алгоритмов защиты.

В ходе исследования выполнено моделирование режимов однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сети 10 кВ с изолированной нейтралью при переходных сопротивлениях от 1 Ом до 10 кОм. Исследование проводилось при повреждении на фидере и на сборных шинах подстанции.

### Результаты и обсуждение

При повреждении фазной изоляции появляется ток ОЗЗ, имеющий емкостный характер. Величина тока зависит от сопротивлений, возникающих по пути его протекания. На рисунке 1 показано изменение тока ОЗЗ и емкостных токов при различных переходных сопротивлениях в диапазоне до 10 кОм.

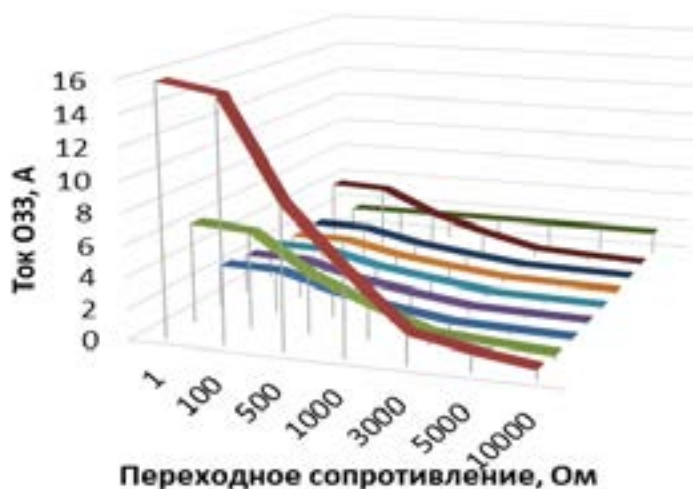


Рисунок 1 – Уровни тока ОЗЗ при различных переходных сопротивлениях в сети 10 кВ с изолированной нейтралью

Суммарный ток в месте ОЗЗ (кривая, обозначенная коричневым цветом) достигает наибольшего значения при металлическом замыкании и уменьшается нелинейно с ростом сопротивления, достигая наименьшего значения при высоком значении  $R_{\text{н}}$  не менее 10 кОм.

При ОЗЗ токи НП в поврежденной и неповрежденных фазах имеют ярко выраженный угловой сдвиг, что служит хорошим и эффективным сигналом поляризации. На рисунке 2 показана разность углов между токами НП при различных переходных сопротивлениях.

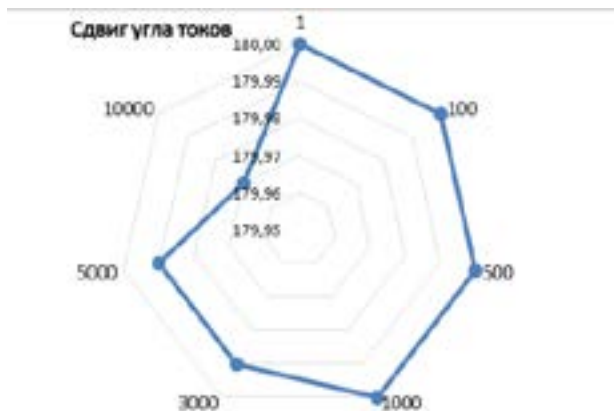


Рисунок 2 – Разность углов тока НП при ОЗЗ на линии в зависимости от переходного сопротивления

Анализ данных показывает, что при низком сопротивлении  $R_n$  разность углов составляет  $180^\circ$ , что указывает на выраженный угловой сдвиг между током поврежденной фазы и емкостными токами неповрежденных фаз. С ростом переходного сопротивления величина тока ОЗЗ уменьшается, сохраняя по-прежнему разность углов, что означает направленность токов при повреждении остаётся различимой, что важно для обнаружения повреждений.

Повреждение фазной изоляции возможно и на шинах подстанции. Результаты исследования данного повреждения приведены на рисунке 3.

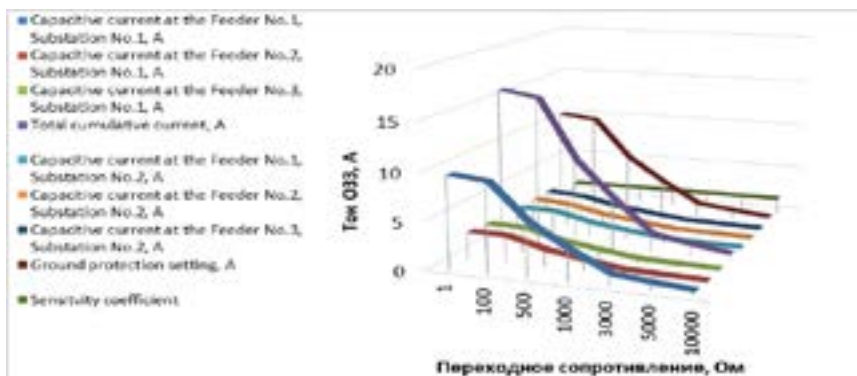


Рисунок 3 – Ток ОЗЗ в зависимости от переходного сопротивления на шинах подстанции 10 кВ

Изменения тока ОЗЗ при различных переходных сопротивлениях в диапазоне до 10 кОм на шинах самой подстанции имеет нелинейный характер. Ток ОЗЗ уменьшается с увеличением переходного сопротивления, направление емкостных токов почти остается одинаковым (Рисунок 4), что указывает на повреждение вне линии, т.е. на шинах подстанции.

Анализ данных показывает, что при высоких значениях  $R_n$  до 10 кОм, когда ток ОЗЗ минимален, разница углов составляет  $0,15^\circ$ . В этом случае, когда происходит повреждение с высоким сопротивлением, угловой сдвиг остаётся надёжным критерием для определения зоны, где произошло ОЗЗ. Это означает, что ОЗЗ можно обнаружить даже при очень низком токе НП.

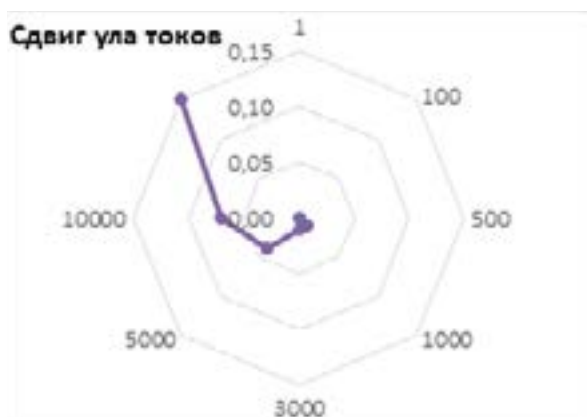


Рисунок 4 – Разница углов токов при ОЗЗ с переходными сопротивлениями на шинах подстанции 10 кВ

Таким образом, появляется необходимость в разработке метода обнаружения ОЗЗ с большими переходными сопротивлениями до 10 кОм, прерывистой или перемежающей электрической дугой на месте замыкания. Для этого предлагается учесть направления только токов НП в поврежденной и не поврежденных фазах.

Тогда предлагается новый метод обнаружения ОЗЗ с переходным сопротивлением разной величины, основанный в сравнении векторов только токов нулевой последовательности. Для этого вводится новое понятие дифференциально-фазовый принцип (метод) обнаружения ОЗЗ (ДФЗ), основанный на сравнении углов токов нулевой последовательности в поврежденной и неповрежденной фазах.

Предлагаемый принцип ДФЗ для обнаружения ОЗЗ вместе с амплитудным значением тока образует комбинированный метод. Тогда новый метод, основанный на дифференциально-фазовом и амплитудном принципах, повышает надежность обнаружения ОЗЗ с большим переходным сопротивлением, сопровождающимся с прерывистой и перемежающейся электрической дугой.

В ходе исследования установлено, что с ростом переходного сопротивления ток ОЗЗ и напряжение нулевой последовательности существенно уменьшаются. Это подтверждается снижением чувствительности токовых защит при высокоомных замыканиях.

Наиболее устойчивым диагностическим признаком оказался фазовый угол токов НП. При повреждении на фидере угол между токами повреждённой фазы и неповреждённых фаз сохранялся близким к  $180^\circ$  даже при  $R_{\pi}$  до 10 кОм, а отклонение не превышало  $0,03-0,04^\circ$ .

На рисунке 5 показан ОЗЗ на отходящем фидере от РУ 6–35 кВ, а на рисунке 6 показаны фазовые соотношения токов НП.

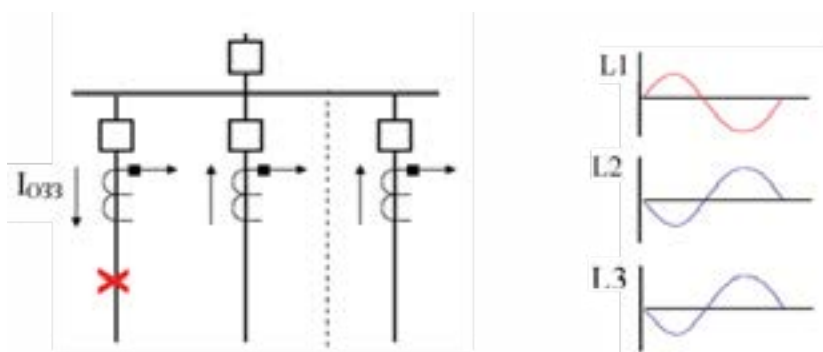


Рисунок 5 – ОЗЗ на отходящем фидере

Рисунок 6 – Фазовые соотношения токов НП

В отличие от амплитудных параметров, фазовый критерий сохраняет информативность при малых токах ОЗЗ и обеспечивает селективное определение повреждённого присоединения. Разность углов между током повреждённой фазы и ёмкостными токами неповреждённых фаз может служить основным признаком определения повреждения, а также позволяет определить линию (фидер), где произошло повреждение.

При ОЗЗ на сборных шинах подстанции установлено, что токи НП всех фидеров имеют одинаковое направление, а разность фазовых углов не превышает  $0-0,15^\circ$ , что позволяет отличать повреждение на шинах от повреждения на фидере.

При повреждении фазной изоляции на шинах подстанции векторы токов будут иметь примерно одинаковое направление. ОЗЗ на шинах подстанции или РУ 6–35 кВ показано на рисунке 7, а на рисунке 8 показаны фазовые соотношения токов НП.

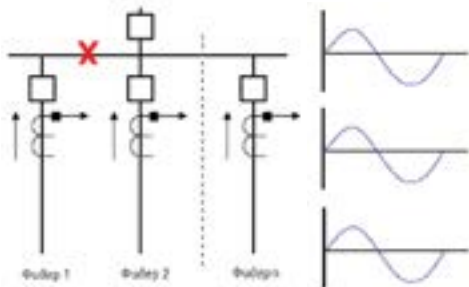


Рисунок 7 – ОЗЗ на шинах РУ 6–35 кВ

Рисунок 8 – Фазовые соотношения емкостных токов

Анализ данных показывает, что векторы отражают только емкостные токи линий, которые имеют одинаковые направления. В этом случае векторы емкостных токов показывают, что ОЗЗ произошло на сборных шинах, а не на отдельной отходящей линии (фидере).

Таким образом, при повреждении фазной изоляции на отходящем фидере, угол между током повреждённой фазы и неповреждённых фаз сохраняется близким  $180^\circ$ . В отличие от амплитудных параметров, фазовый критерий сохраняет информативность при малых токах ОЗЗ.

При ОЗЗ на шинах подстанции установлено, что емкостные токи всех фаз имеют одинаковые направления и разность углов не превышают  $0,15^\circ$ . Данный факт позволяет отличать повреждение на шинах от повреждения на линии.

Комбинированный метод обнаружения ОЗЗ на основе амплитуды тока НП и фазового угла токов НП позволяет управлять релейной защитой от ОЗЗ централизованно. Создание Централизованного устройства релейной защитой от замыканий на землю (ЦУРЗОЗЗ) позволяет совместный анализ амплитуды и фазового угла токов НП и обеспечивает устойчивую работу при высокоомных, дуговых и перемежающихся ОЗЗ.

Моделирование работы ЦУРЗОЗЗ подтверждают эффективность предложенного комбинированного метода, основанного на дифференциально-фазовом принципе. Метод сохраняет чувствительность и селективность при переходных сопротивлениях до 10 кОм, не требует сложной настройки по ёмкостным токам сети и обеспечивает надёжную работу в сетях 6–35 кВ.

## Выводы

Проведён анализ существующих методов защиты от ОЗЗ в сетях 6–35 кВ. Установлено, что традиционные защиты недостаточно чувствительны при высоких переходных сопротивлениях и нестабильны при дуговых и перемежающихся замыканиях.

Установлено снижение тока ОЗЗ более чем в 25 раз при увеличении переходного сопротивления до 10 кОм.

Определено, что наиболее устойчивым диагностическим признаком является фазовая разность токов НП. В сетях с изолированной и компенсированной нейтралью угол между токами повреждённого и неповреждённых фидеров близок к  $180^\circ$ , а при повреждении на шинах токи имеют одинаковое направление.

Предложен новый дифференциально-фазовый принцип обнаружения повреждения фазной изоляции при ОЗЗ с переходным сопротивлением. Данный метод основан на разнице углов токов НП поврежденной фазы и неповрежденных фаз.

Разработан комбинированный метод обнаружения ОЗЗ на основе совместного анализа амплитуды и дифференциально-фазового принципа, реализованный в ЦУРЗ.

Моделирование в Matlab подтвердило работоспособность метода при переходных сопротивлениях до 10 кОм, а также при дуговых перемежающихся замыканиях. Алгоритм обеспечивает высокую чувствительность и селективность при снижении вероятности ложных срабатываний.

Практическое применение ЦУРЗОЗЗ позволит повысить надёжность электроснабжения сетей 6–35 кВ, сократить время поиска повреждений, снизить эксплуатационные затраты и повысить

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Jetpissov, M., Tergemes, K., Sheryazov, S., Berdibekov, A., Smailova, G. A. Selective method for identifying single-phase ground faults with transient resistance in isolated neutral medium-voltage networks // Energies. – 2025. – Vol. 18, № 21. – P. 5699. <https://doi.org/10.3390/en18215699>.

2 Sheryazov, S. K., Uspanova, A. I., Titko, J., Koshkin, I. V., Utegulov, A. B. Modeling 6(10)-35 kV electrical network for fault location via negative correlation // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2025. – Vol. 14, № 1. – P. 60–72. <https://doi.org/10.11591/eei.v14i1.7544>.

3 IEEE Std 142-2007. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. – New York : IEEE, 2007. – 225 p.

4 **Джетписов М. А., Тергемес К. Т., Шерьязов С. К.** Разработка метода определения поврежденной линии при однофазном замыкании на землю // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. – 2025. – № 2. – С. 87–112. <https://doi.org/10.48081/ORKU1028>.

5 **Ustinov, D., Nazarychev, A., Pelenev, D., Babyr, K., Pugachev, A.** Investigation of the effect of current protections in conditions of single-phase ground fault through transient resistance in the electrical networks of mining enterprises // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 9. – P. 3690. – <https://doi.org/10.3390/en16093690>.

6 **Lin, X., Ke, S., Gao, Y., Wang, B., Liu, P.** A selective single phase-to-ground fault protection for neutral uneffectively grounded systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2011. – Vol. 33. – P. 1012–1017. – <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.02.009>.

7 **Sifat, A. I., McFadden, F. J. S., Rayudu, R. et al.** Monitoring and detection of low-current high-impedance faults in distribution networks // arXiv preprint. – 2022. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/abs/2210.16981>.

8 **Веников В. А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М. : Высшая школа, 1985. – 536 с.

9 **Шерьязов С. К., Пятков А. В., Коновалов Е. С.** Анализ способов регулирования режимов компенсации емкостных токов в электрической сети с изолированной нейтралью // Современные тенденции агроинженерных наук и инновационные технологии в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Челябинск : ЮУрГАУ, 2021. – С. 269–278.

10 **Шерьязов С. К., Пятков А. В., Коновалов Е. С.** Анализ устройств компенсации емкостных токов при ОЗВ в сетях с изолированной нейтралью // Актуальные вопросы социально-экономических, технических и естественных наук : материалы нац. науч. конф. – Челябинск : Южно-Уральский ГАУ, 2021. – С. 271–279.

11 **Костенко М. В., Перельман Л. С.** Переходные процессы в электроэнергетических системах. – М. : Энергия, 1973. – 416 с.

12 **Horowitz, S. H., Phadke, A. G.** Power System Relaying. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2013. – 379 p.

13 **Bouziiane, B., Elmaouhab, A. et al.** Smart grid reliability using reliable block diagram case study: Adrar's isolated network of Algeria // 2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET). – Istanbul : IEEE, 2019. – <https://doi.org/10.1109/PGSRET.2019.8882711>.

14 **Guillen, D., Olivares-Galvan, J. C., Escarela-Perez, R. et al.** Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization // Measurement. – 2019. – Vol. 141. – P. 24–36.

15 ABB. Section 8.6 MV feeder earth-fault protection // Distribution Automation Handbook – Power System Protection Practices. – ABB Library, 2011. – 20 p.

## REFERENCES

1 **Jetpissov, M., Tergemes, K., Sheryazov, S., Berdibekov, A., Smailova, G.** A Selective Method for Identifying Single-Phase Ground Faults with Transient Resistance in Isolated Neutral Medium-Voltage Networks // *Energies*. – 2025. – 18(21). – 5699. – <https://doi.org/10.3390/en18215699>.

2 **Sheryazov, S. K., Uspanova, A. I., Titko, J., Koshkin, I. V., Utegulov, A. B.** Modeling 6(10)-35 kV Electrical Network for Fault Location via Negative Correlation // *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. – 2025. – 14(1). – P. 60–72. <https://doi.org/10.11591/eei.v14i1.7544>.

3 IEEE Std 142–2007. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. – New York : IEEE, 2007. – 225 p.

4 **Jetpissov, M. A., Tergemes, K. T., Sheryazov, S. K.** Razrabotka metoda opredeleniya povrezhdennoy linii pri odnofaznom zamykanii na zemlyu [Development of a Method for Determining a Faulted Line during Single-Phase-to-Ground Fault]. *Vestnik Toraighyrov Universiteta // Energeticheskaya Seriya*. – 2025. – No. 2. – P. 87–112. – <https://doi.org/10.48081/ORKU1028>.

5 **Ustinov, D., Nazarychev, A., Pelenev, D., Babyr, K., Pugachev, A.** Investigation of the Effect of Current Protections in Conditions of Single-Phase Ground Fault through Transient Resistance in the Electrical Networks of Mining Enterprises // *Energies*. – 2023. – 16(9). – P. 3690. <https://doi.org/10.3390/en16093690>.

6 **Lin, X., Ke, S., Gao, Y., Wang, B., Liu, P.** A Selective Single Phase-to-Ground Fault Protection for Neutral Uneffectively Grounded Systems // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2011. – 33. – P. 1012–1017. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.02.009>.

7 **Sifat, A. I., McFadden, F. J. S., Rayudu, R. et al.** Monitoring and Detection of Low-Current High-Impedance Faults in Distribution Networks // *arXiv Preprint*. – 2022– [Electronic resource]. – <https://arxiv.org/abs/2210.16981>.

8 **Venikov, V. A.** Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh [Transient Electromechanical Processes in Electric Power Systems]. – Moscow : Vysshaya shkola, 1985 – 536 p.

9 **Sheryazov, S. K., Pyatkov, A. V., Konovalov, E. S.** Analiz sposobov regulirovaniya rezhimov kompensatsii emkostnykh tokov v elektricheskoy seti s izolirovannoy neytralyu [Analysis of Methods for Regulating Capacitive Current Compensation Modes in Electrical Networks with Isolated Neutral] //

Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Modern Trends in Agroengineering Sciences and Innovative Technologies in Agriculture”. – Chelyabinsk: South Ural State Agrarian University, 2021. – P. 269–278.

10 **Sheryazov, S. K., Pyatkov, A. V., Konovalov, E. S.** Analiz ustroystv kompensatsii emkostnykh tokov pri OZZ v setyakh s izolirovannoy neytralyu [Analysis of Capacitive Current Compensation Devices during Single-Phase Ground Faults in Networks with Isolated Neutral] // Proceedings of the National Scientific Conference “Current Issues of Socio-Economic, Technical and Natural Sciences”. – Chelyabinsk: South Ural State Agrarian University, 2021. – P. 271–279.

11 **Kostenko, M. V., Perelman, L. S.** Perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh [Transient Processes in Electric Power Systems]. – Moscow : Energiya, 1973. – P. 416.

12 **Horowitz, S. H., Phadke, A. G.** Power System Relaying. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2013. – P. 379.

13 **Bouziane, B., Elmaouhab, A. et al.** Smart Grid Reliability Using Reliable Block Diagram Case Study: Adrar’s Isolated Network of Algeria. 2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET). – Istanbul : IEEE, 2019. – <https://doi.org/10.1109/PGSRET.2019.8882711>.

14 **Guillen, D., Olivares-Galvan, J. C., Escarela-Perez, R. et al.** Diagnosis of Interturn Faults of Single-Distribution Transformers under Controlled Conditions during Energization // Measurement. – 2019. – Vol. 141. – P. 24–36.

15 ABB. Section 8.6 MV Feeder Earth-Fault Protection // Distribution Automation Handbook – Power System Protection Practices. – ABB Library, 2011. – 20 p.

Поступило в редакцию 22.05.26.

Поступило с исправлениями 03.06.26.

Принято в печать 04.06.26.

*\*М. А. Джетписов<sup>1</sup>, С. К. Шерьязов<sup>2</sup>, К. Т. Тергемес<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

<sup>2</sup>Оңтүстік Орал мемлекеттік аграрлық университеті, Ресей Федерациясы, Челябин қ.

22.05.26 ж. баспаға түсті.

03.06.26 ж. түзетулерімен түсті.

04.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

## **ДИФФЕРЕНЦИАЛДЫ-ФАЗАЛЫҚ ПРИНЦИП НЕГІЗІНДЕГІ ЖЕРГЕ БІР ФАЗАЛЫ ТҰЙЫҚТАЛУДЫ АНЫҚТАУДЫҢ БІРІКТІРІЛГЕН ӘДІСІН ӘЗІРЛЕУ**

*Мақала 6–35 кВ тарату электр желілеріндегі жерге бір фазалы тұйықталуларды (ЖБФТ) анықтаудың нөлдік тізбектегі токтарды талдау принципіне негізделген біріктірілген әдісін әзірлеуге арналған. Жұмыста ЖБФТ-дан қорғаныстың қолданыстағы релелік қорғау әдістері мен құралдарына талдау жүргізіліп, олардың негізгі кемшіліктері көрсетілген. Атап айтқанда, жоғары өтпелі кедергілер мен доғалық үзік жерге тұйықталулар кезінде қорғаныстың сезімталдығы жеткіліксіз екендігі анықталған.*

*Зерттеуде нөлдік тізбектегі токтардың амплитудасы мен фазалық бұрышын бірлесіп талдауға негізделген әдіс ұсынылған. Бұл әдіс жерге тұйықталудың пайда болу аймағын – желіден шығатын фидерде немесе қосалқы станцияның жинақтаушы шиналарында – селективті түрде анықтауға мүмкіндік береді. Оқшауланған және компенсацияланған бейтарапты желілерде зақымдалған және зақымдалмаған фидерлердің токтары арасындағы бұрыш шамамен  $180^\circ$  болатыны, ал бейтарап нүктесі резистор арқылы жерлендірілген желілерде бұл бұрыш  $135\text{--}150^\circ$  аралығында болатыны көрсетілген. Осыған байланысты зақымдалған және зақымдалмаған фазалардың сыйымдылық токтарының бағытын ескеретін жаңа принцип ұсынылған.*

*Жұмыста ЖБФТ анықтау және қорғаныстың сенімділігін арттыру үшін нөлдік тізбектегі токтарды дифференциалды-фазалық талдау принципі атты жаңа ұғым енгізілген. Сонымен қатар өтпелі кедергінің шамасы мен ЖБФТ тогының амплитудасы ескеріліп, бұл жоғары кедергілі зақымданулар кезінде сигнал беру режимін, ал төмен кедергілі тұрақты тұйықталулар кезінде ажырату режимін жүзеге асыратын адаптивті қорғаныс принципін іске асыруға мүмкіндік береді.*

*Қорғаныс алгоритмін әзірлеу барысында Matlab бағдарламалық ортасында орындалған жерге тұйықталу кезіндегі өтпелі процестерді модельдеу нәтижелері пайдаланылды. Зерттеу нәтижелері өтпелі кедергі 10 кОм-ға дейін болған жағдайда қорғаныстың сезімталдығы, селективтілігі және орнықтылығы артатынын растады.*

*Ұсынылған әдіс электрмен жабдықтаудың сенімділігін арттыруға, электр жабдықтарының зақымдану қаупін төмендетуге, пайдалану шығындарын азайтуға және жедел персоналдың қауіпсіздігін жоғарылатуға мүмкіндік береді.*

*Кілтті сөздер: бір фазалы қысқа тұйықталу, оқшауланған бейтарап, компенсацияланған бейтарап, резистивті бейтарап, отпелі кедергі, релелік қорғаныс, селективтілік, модельдеу.*

\*M. A. Jetpissov<sup>1</sup>, S. K. Sheryazov<sup>2</sup> K. T. Tergemes<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty;

<sup>2</sup>South Ural State Agrarian University, Russian Federation, Chelyabinsk.

Received 22.05.26.

Received in revised form 03.06.26.

Accepted for publication 04.06.26.

## **DEVELOPMENT OF A COMBINED METHOD FOR SINGLE PHASE-TO-GROUND FAULT DETECTION BASED ON THE DIFFERENTIAL-PHASE PRINCIPLE**

*The article is devoted to the development of a combined method for detecting single-phase-to-ground faults (SPGF) in 6–35 kV distribution electrical networks based on the principle of zero-sequence current analysis. The paper analyzes existing relay protection methods and means for SPGF detection and identifies their main disadvantages associated with insufficient sensitivity under high transient resistance conditions and intermittent arc ground faults.*

*A method based on the combined analysis of the amplitude and phase angle of zero-sequence currents is proposed. The method makes it possible to selectively determine the fault location zone, whether on an outgoing feeder or on the substation busbars. It is shown that in networks with isolated and compensated neutral grounding, the phase angle between the currents of faulted and healthy feeders is approximately 180°, whereas in networks with resistive neutral grounding this angle is within the range of 135–150°. In this regard, a principle considering the direction of capacitive currents of faulted and healthy phases is proposed.*

*The paper introduces a new concept referred to as the differential-phase principle of zero-sequence current analysis for SPGF detection and improvement of protection reliability. In addition, the transient resistance*

*value and the SPGF current amplitude are taken into account, making it possible to implement an adaptive protection principle with alarm signaling for high-impedance faults and tripping for stable low-impedance faults.*

*The protection algorithm was developed using simulation results of transient processes during SPGF obtained in the Matlab software environment. The research results confirmed an increase in sensitivity, selectivity, and operational stability of the protection system at transient resistances up to 10 kOhm.*

*The proposed method improves the reliability of power supply systems, reduces the risk of electrical equipment damage, decreases operating costs, and enhances the safety of operating personnel.*

*Keywords: single-phase-to-ground fault, isolated neutral, compensated neutral, resistive neutral, transient resistance, relay protection, selectivity, modeling.*

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz