

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

№ 4 (2021)

---

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/CTNS7211>

---

**Бас редакторы – главный редактор**

Кислов А. П.

*к.т.н., доцент*

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

**Редакция алкасы – Редакционная коллегия**

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов Т. А.,	<i>к.т.н., доцент (Россия)</i>
Оспанова Н. Н.,	<i>к.п.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD, доцент</i>
Шокубаева З. Ж.	<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

**\*А. Н. Новожилов<sup>1</sup>, А. К. Садыкова<sup>2</sup>, Т. А. Новожилов<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup>Торайгыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар;

<sup>3</sup>Омский государственный технический университет,

Российская Федерация, г. Омск

## **ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ КОСВЕННЫМ МЕТОДОМ**

*Предложены два метода измерения емкости фазы кабельной сети с изолированной нейтралью относительно земли и токов однофазного замыкания на землю в сети. Приведены результаты измерения этих величин и дана оценка точности измерений.*

*Ключевые слова: сеть с изолированной нейтралью, емкость фазы относительно земли, ток однофазного замыкания на землю, погрешность измерения.*

### **Введение**

Сети с изолированной нейтралью являются сетями с малым током замыкания на землю [1]. Как правило, это кабельные сети промышленных предприятий на напряжение 6 и 10кВ. Иногда, в случае необходимости, в таких сетях токи однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) измеряют напрямую, замыкая с помощью резервного выключателя через амперметр на землю одну из фаз [2]. Точность измерения токов ОЗЗ по такой схеме определена только точностью измерительного прибора. Однако, такое измерение может вызвать срабатывания устройств релейной защиты от ОЗЗ с нарушением рабочего цикла производства. А потому его осуществление связано с известным риском.

Кроме того, при прямом замыкании на землю одной из фаз кабельной сети на двух других фазах потенциал относительно земли с величины равной фазному напряжению возрастет до линейного напряжения. Что перегружает изоляцию по напряжению в  $\sqrt{3}$  раз [3]. Что может спровоцировать возникновения ОЗЗ в одной из этих фаз. Поэтому на практике измерения токов ОЗЗ по такой схеме избегают.

### Материалы и методы

Этого можно избежать, если осуществлять однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) через шунт [1]. В этом случае в качестве шунта может использоваться активное сопротивление, индуктивность или емкость, рассчитанные на напряжение сети и способные рассеять тепло от токов, протекающих через шунт в процессе измерения. С этой точки зрения наиболее проста и доступна схема измерения, в которой качестве шунта используют емкость. В этом случае процессы, протекающие в сети при подключении шунта, исследуются с помощью схемы на рисунке 1, где  $C_{ш}$  – емкость шунта; PA1 – амперметр для измерения токов в шунте; PV1 – вольтметр для измерения смещения нейтрали.

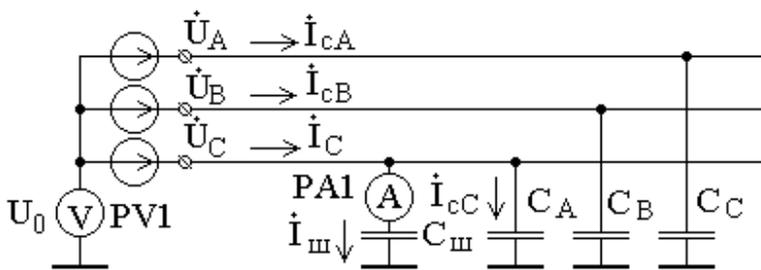


Рисунок 1 – Схема распределения емкостных токов при ОЗЗ через шунт в сети с изолированной нейтралью

Из схемы на рисунке 1 видно, что величина тока  $I_{ш}$  в шунте и напряжение  $U_0$  смещения нейтрали при известном напряжении сети и заданной емкости  $C_{ш}$  шунта будут зависеть только от емкостей фаз  $C_A$ ,  $C_B$  и  $C_C$  относительно земли. В связи с этим возникает возможность определения емкости фазы сети и тока ОЗЗ двумя способами. В первом способе определение этих величин осуществляется по результатам измерения тока  $I_{ш}$  в шунте, а во втором случае – по результатам измерения напряжения  $U_0$  в нейтрали.

### Результаты и обсуждения

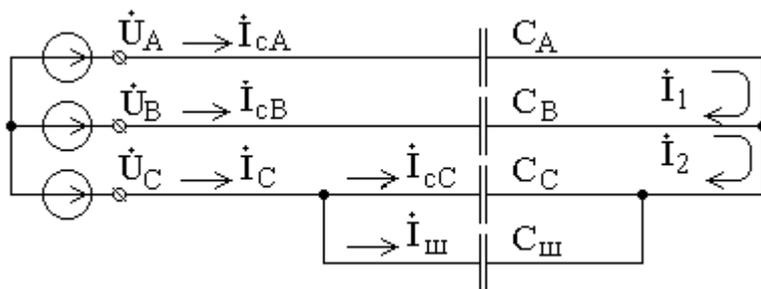


Рисунок 2 – Расчетная схема емкостных токов при ОЗЗ через шунт

Для исследования процессов в трехфазной сети с изолированной нейтралью при ОЗЗ можно воспользоваться математической моделью, в основе которой лежит метод контурных токов [4]. Расчетная схема для этого метода приведена на рисунке 2. Ей соответствуют уравнения

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1(jX_{cA} + jX_{cB}) + \dot{I}_2(-jX_{cB}) &= -\dot{U}_A + \dot{U}_B; \\ \dot{I}_1(-jX_{cB}) + \dot{I}_2(jX_{cB} + jX_{\text{эКВ}}) &= -\dot{U}_B + \dot{U}_C. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$  и  $\dot{U}_C$  – напряжение фаз А, В и С сети относительно нейтрали в нормальном режиме работы сети;  $jX_{cA} = jX_{cB} = jX_{cC} = 1/2\pi f C_{\phi}$  – величины реактивных сопротивлений емкостей фаз А, В и С относительно земли;  $X_{\text{эКВ}} = 1/2\pi f (C_{\phi} + C_{\text{ш}})$ ;  $f$  – частота сети;  $C_{\text{ш}}$  – емкость измерительного шунта.

При этом контурные токи определяются как

$$\dot{I}_1 = \frac{\begin{vmatrix} (-\dot{U}_A + \dot{U}_B) & (-jX_{cB}) \\ (-\dot{U}_B + \dot{U}_C) & (jX_{cB} + jX_{\text{эКВ}}) \end{vmatrix}}{\Delta}, \quad (2)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\begin{vmatrix} (jX_{cA} + jX_{cB}) & (-\dot{U}_A + \dot{U}_B) \\ (-jX_{cB}) & (-\dot{U}_B + \dot{U}_C) \end{vmatrix}}{\Delta}, \quad (3)$$

а определитель системы

$$\Delta = \begin{vmatrix} (jX_{cA} + jX_{cB}) & (-jX_{cB}) \\ (-jX_{cB}) & (jX_{cB} + jX_{эКВ}) \end{vmatrix}. \quad (4)$$

В связи с тем, что сети 6 и 10кВ промышленных предприятий в основном являются кабельными, то для таких сетей вполне допустимо принимать  $C_A = C_B = C_C = C_\phi$ . Тогда по известным значениям контурных токов и с учетом схемы на рисунке 2 токи через емкости фаз А, В и С сети на землю рассчитываются как

$$\dot{I}_{cA} = \dot{I}_1; \quad \dot{I}_{cB} = \dot{I}_2 - \dot{I}_1; \quad \dot{I}_C = -\dot{I}_2, \quad \dot{I}_{cC} = \frac{\dot{I}_C X_{ш}}{X_{эКВ}}, \quad \dot{I}_{cC} = \frac{\dot{I}_C X_\phi}{X_{эКВ}}. \quad (5)$$

Напряжение смещения нейтрали при подключении шунта емкостью  $C_{ш}$  определяется выражением

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_C - jX_{эКВ} \dot{I}_C. \quad (6)$$

В связи с этим реализация первого способа заключается в том, что для заданной величине емкости  $C_{ш}$  используемого шунта строится зависимость  $I_{ш} = f(C_\phi)$ . Затем по измеренной величине тока  $I_{ш}$  и построенной зависимости  $I_{ш} = f(C_\phi)$  определяется емкость  $C_\phi$  фазы сети. Далее по полученной величине емкости  $C_\phi$  фазы сети рассчитывается величина тока ОЗЗ как

$$I_0 = 3\omega U_\phi C_\phi, \quad (7)$$

где  $U_\phi$  – фазное напряжение сети.

Расчет зависимости  $I_{ш} = f(C_\phi)$  по приведенным математическим выражениям вручную представляет собой трудоемкую задачу. Ее можно упростить, если воспользоваться для этой цели разработанной специально для этого случая на кафедре «Электроэнергетика» в Торайғыров Университет программой в редакторе БЕЙСИК [5].

Результаты расчета зависимости  $I_{ш} = f(C_\phi)$  с помощью этой программы для отдельной подстанции Павлодарского нефтехимического завода с линейным напряжением в сети 6кВ при емкости шунта равной 0,5 мкф приведены на рисунке 3.

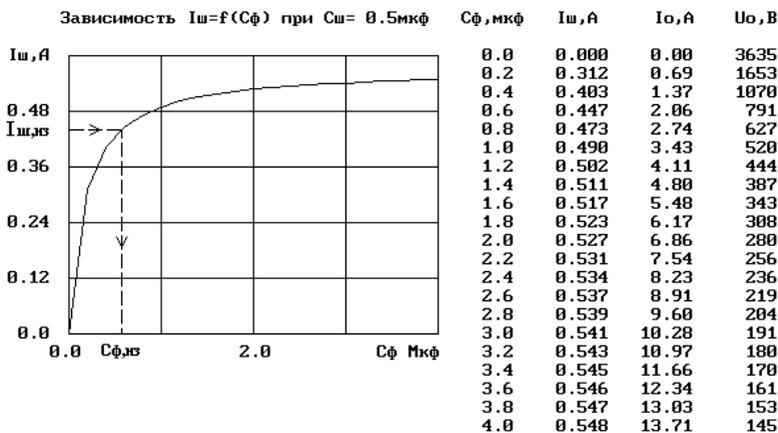


Рисунок 3 – Форма вывода результатов расчета зависимости

$$I_{ш} = f(C_{\phi})$$

Емкость  $C_{\phi}$  фазы подстанции относительно земли определяется по зависимости  $I_{ш} = f(C_{\phi})$  следующим образом. Если допустить, что величина тока  $I_{ш}$ , из в шунте при измерении равна 0,44А, то ее откладывают по оси тока шунта  $I_{ш}$ . Затем через нее как показано на рисунке 3 проводят горизонтальную линию до пересечения с зависимостью  $I_{ш} = f(C_{\phi})$ . Далее из полученной точки пересечения опускается вертикальная линия и по оси емкости  $C_{\phi}$  определяется емкость фазы сети. В данном случае в соответствии с рисунком 3 она равна 0,35 мкф. Погрешность определения  $C_{\phi}$  в этом случае определена точностью измерительного прибора и метода расчета зависимости  $I_{ш} = f(C_{\phi})$ . Как показали эксперименты, погрешность определения тока ОЗЗ этим способом не превышает 5%. Однако, реализация этого метода достаточно сложна. Это вызвано подключением амперметра к фазе сети через шунт и необходимостью обеспечения безопасности персонала при измерениях.

Реализация второго способа заключается в том, что для заданной величине емкости шунта  $C_{ш}$  строится зависимость  $U_0 = f(C_{\phi})$ . Затем по измеренной величине напряжения  $U_0$  смещения нейтрали и построенной зависимости  $U_0 = f(C_{\phi})$  определяется емкость  $C_{\phi}$  фазы сети относительно земли. Далее по полученной величине емкости  $C_{\phi}$  фазы сети определяется величина тока ОЗЗ.

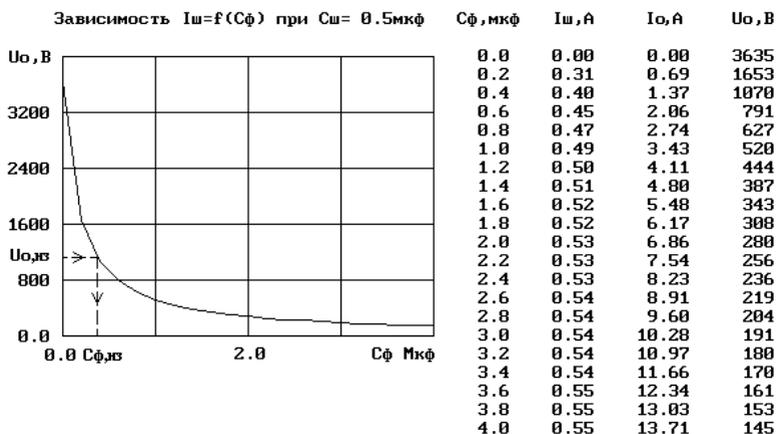


Рисунок 4 – Форма вывода результатов расчета зависимости

$$U_0 = f(C_{\phi})$$

Результаты расчета зависимости  $U_0 = f(C_{\phi})$  для той же подстанции Павлодарского нефтехимического завода при емкости шунта равной 0,5 мкф приведены на рисунке 4.

Емкость  $C_{\phi}$  фазы подстанции относительно земли и ток ОЗЗ определяется с помощью зависимости  $U_0 = f(C_{\phi})$  так же, как это делалось при реализации первого способа. Погрешность определения  $C_{\phi}$  и  $I_0$  и в этом случае не превышает 5%. При этом для реализации этого способа достаточно показаний стационарного вольтметра предназначенного для измерения напряжения нулевой последовательности.

### Выводы

1 Предложенные способы косвенного измерения тока ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью на работающем оборудовании достаточно просты и позволяют измерить эти токи с погрешностью не превышающей 5%.

2 С практической точки зрения при измерении тока ОЗЗ предпочтение следует отдать второму способу, так как для его реализации не требуется особых мероприятий по защите обслуживающего персонала от поражения электрическим током.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Корогодский, В. И., Кужеков, С. Л., Паперно, Л. Б.** Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
- 2 **Гладилин, Л. В., Щуцкий, В. И., Бацежев, Ю. Г., Чеботаев, Н. И.** Электробезопасность в горнодобывающей промышленности. – М. : «Недра», 1977. – 327 с.
- 3 **Меньшов, Б. Г.** Расчет тока замыкания на землю в карьерных электрических сетях. Горные машины и автоматика. – 1970. – № 4. – С. 65–67.
- 4 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. – М. : Высшая школа, 1967. – 775 с.
- 5 **Бороденко, В. А.** Программирование в среде Turbo Basic (учебное пособие). – Павлодар : Кереку, 2003. – 81 с.

## REFERENCES

- 1 **Korogodskiy, V. I., Kuzhekov, S. L., Paperno, L. B.** Releynaya zashchita elektrodvigatelay napryazheniyem vyshe 1 kV. – Moscow : Energoatomizdat, 1987. – 248 p.
- 2 **Gladilin, L. V., Shchutskiy, V. I., Batsezhev, Yu. G., Chebotayev, N. I.** Elektrobezopasnost' v gornodobyvayushchey promyshlennosti. – Moscow : «Nedra», 1977. – 327 p.
- 3 **Men'shov, B. G.** Raschet toka zamykaniya na zemlyu v kar'yernykh elektricheskikh setyakh. Gornyye mashiny i avtomatika. – 1970. – № 4. – P. 65–67.
- 4 **Bessonov, L. A.** Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. – Moscow : Vysshaya shkola, 1967. – 775 p.
- 5 **Borodenko, V. A.** Programmirovaniye v srede Turbo Basic : Textbook. – Pavlodar : Kereku, 2003. – 81 p.

Материал поступил в редакцию 28.11.21.

\**А. Н. Новожилов<sup>1</sup>, А. К. Садыкова<sup>2</sup>, Т. А. Новожилов<sup>3</sup>*

<sup>1,2</sup>Торайгыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

<sup>3</sup>Омбы мемлекеттік техникалық университеті,

Ресей Федерациясы, Омбы қ.

Материал 28.11.21 баспаға түсті.

**ОҚШАУЛАНҒАН БЕЙТАРАБЫ ҚОСЫЛУМЕН  
ЖЕЛІЛЕРДЕГІ БІР ФАЗАЛЫҚ ЖЕРГЕ ТҰЙЫҚТАЛУ  
ТОКТАРЫН ЖАНАМА ӘДІСПЕН ӨЛШЕУ**

*Жерге қатысты оқшауланған бейтарап кабельдік желі фазасының сыйымдылығын және желідегі бір фазалы жерге тұйықталу токтарын өлшеудің екі әдісі ұсынылады. Бұл шамаларды өлшеу нәтижелері беріледі және өлшеу дәлдігіне баға беріледі.*

*Кілтті сөздер: оқшауланған бейтарабы қосылумен желі, жерге қатысты фазалық сыйымдылық, бір фазалы жерге тұйықталу тогы, өлшеу қателігі.*

\*N. Novozhilov<sup>1</sup>, A. K. Sadykova<sup>2</sup>, T. A. Novozhilov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Toraighyrov University,  
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

<sup>3</sup>Omsk State Technical University,  
Russian Federation, Omsk.

Material received on 28.11.21.

**MEASUREMENT OF SINGLE-PHASE EARTH FAULT CURRENTS  
IN NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL INDIRECT METHOD**

*Two methods of measuring the capacitance of the phase of a cable network with an isolated neutral relative to earth and single-phase earth fault currents in the network are proposed. The results of measurements of these quantities are given and an estimate of the measurement accuracy is given.*

*Keywords: network with isolated neutral, phase capacitance relative to earth, single-phase earth fault current, measurement error.*

Теруге 28.11.2021 ж. жіберілді. Басуға 14.12.2021 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

9,02 Мб RAM

Шартты баспа табағы 8,40. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3867

Сдано в набор 28.11.2021 г. Подписано в печать 14.12.2021 г.

Электронное издание

9,02 Мб RAM

Усл. печ. л. 8,40. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 3867

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университет» КЕ АҚ

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

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университет» КЕ АҚ

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

8 (7182) 67-36-69

E-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

[www.vestnik-energy.tou.edu.kz](http://www.vestnik-energy.tou.edu.kz)