

УДК 621.316.925

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_2\_101

## КОМПЕНСАЦИЯ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФАЗОПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

**А.В. Слузова**ORCID: 0000-0002-9838-2996 e-mail: [simaginaanastasia30@gmail.com](mailto:simaginaanastasia30@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.А. Лоскутов**ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: [loskutov.nnov@gmail.com](mailto:loskutov.nnov@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Рассмотрены негативные последствия, возникающие в сетях среднего напряжения при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ), а также технические средства, предназначенные для предотвращения таких последствий. Исследовано применение для этих целей фазоповоротного устройства (ФПУ) на базе многообмоточных трансформаторов и тиристорных коммутаторов. Обсуждается функциональная схема и алгоритм управления ФПУ, а также результаты экспериментов, подтверждающих эффективность его применения для компенсации емкостного тока при возникновении различных видов ОЗЗ.

**Ключевые слова:** емкостный ток, дугогасящий реактор, компенсация емкостного тока, однофазное замыкание на землю, перенапряжения, фазоповоротное устройство.

**Для цитирования:** Слузова А.В., Лоскутов А.А. Компенсация токов однофазного замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью с применением фазоповоротного устройства // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 101-120. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_2\_101

# COMPENSATION OF SINGLE-PHASE EARTH FAULT CURRENTS IN NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL USING PHASE-REVERSAL DEVICE

**A.V. Sluzova**

ORCID: 0000-0002-9838-2996 e-mail: [simaginaanastasia30@gmail.com](mailto:simaginaanastasia30@gmail.com)

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.A. Loskutov**

ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: [loskutov.nnov@gmail.com](mailto:loskutov.nnov@gmail.com)

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract:** The negative consequences arising in medium-voltage networks with single-phase earth faults, as well as technical means designed to prevent such consequences, are considered. The use of a phase-reversal device based on multi-winding transformers and thyristor switches for these purposes is being investigated. The functional scheme and control algorithm of the phase-reversal device are discussed, as well as the results of experiments confirming the effectiveness of its use for compensation of capacitive current in the occurrence of various types of single-phase earth faults.

**Keywords:** capacitive current, arcing reactor, capacitive current compensation, single-phase earth fault, overvoltages, phase shifter.

**For citation:** A.V. Sluzova and A.A. Loskutov, «Compensation of single-phase earth fault currents in networks with isolated neutral using phase-reversal device», *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 101-120, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_2\_101

## I. Введение

К наиболее частым видам повреждений на линиях электропередачи относится однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). На ОЗЗ приходится более 75 % всех повреждений в электроэнергетических системах. Это вид повреждения, при котором одна из фаз трехфазной системы замыкается на землю или на элемент, электрически связанный с землей [1]. Причинами возникновения ОЗЗ являются старение изоляции, развитие скрытых заводских дефектов или дефектов, образовавшихся при строительстве и монтаже, механические разрушения кабелей при земляных работах и др.

Такое повреждение не требует немедленного отключения, однако, его длительное воздействие может привести к развитию аварийной ситуации. В настоящее время в России приблизительно 20 % кабельных сетей 6-10 кВ работают в режиме компенсированной нейтрали и около 80 % – с

изолированной нейтралью. Основным недостатком работы сети с изолированной нейтралью является высокая вероятность возникновения дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ), сопровождающихся опасными перенапряжениями и значительным увеличением среднеквадратичного значения тока в месте повреждения. По данным [2], до 80 % ОЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ, прежде всего, в начальной стадии развития повреждения изоляции, имеют дуговой перемежающийся характер, обуславливающий высокую вероятность перехода замыкания на землю в более тяжелые виды повреждений: двойные и многоместные замыкания на землю или междуфазные короткие замыкания (КЗ) в месте ОЗЗ.

Дуговые прерывистые ОЗЗ являются наиболее опасным видом электрических повреждений в сетях 6-10 кВ, поскольку сопровождаются значительными перенапряжениями на нейтрали и неповрежденных фазах. Перенапряжения на неповрежденных фазах, распространяющиеся по всей электрически связанной сети, могут обусловить возникновение вторичных пробоев в точках ослабленной изоляции и переходы относительно безопасных ОЗЗ двойные и многоместные замыкания на землю, отключаемые релейной защитой. Особенно опасны двойные и многоместные замыкания на землю в сетях 6-10 кВ собственных нужд электростанций и систем электроснабжения различных отраслей промышленности, приводящие к внезапным отключениям двух и более электродвигателей и серьезным нарушениям технологических процессов, связанных с производством или потреблением электроэнергии.

## **II. Требования к компенсации емкостного тока замыкания на землю**

В соответствии с типовой инструкцией по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ (ТИ 34-70-070-87) РД 34.20.179 [3] к основным требованиям относятся следующие четыре.

1. Компенсация емкостного тока замыкания на землю в сетях 6-35 кВ должна применяться для уменьшения тока замыкания на землю, снижения скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения заземляющей дуги, уменьшения перенапряжений при повторных зажиганиях дуги и создания условий для ее самопогасания.

2. Компенсация должна применяться при следующих значениях емкостного тока замыкания на землю сети в нормальных режимах ее работы:

- в воздушных сетях 6-20 кВ на железобетонных или металлических опорах и во всех сетях 35 кВ – при токе более 10 А;
- в воздушных сетях, не имеющих железобетонных или металлических опор: при напряжении 6 кВ – при токе более 30 А, при напряжении 10 кВ – более 20 А, при напряжении 15-20 кВ – более 15 А. Компенсацию допускается применять также в воздушных сетях 6-10 кВ при емкостном токе менее 10 А.

3. Автоматическая настройка компенсации рекомендуется в сетях 35 кВ при емкостном токе замыкания на землю более 10 А и в сетях 6-10 кВ при емкостном токе более 50 А.

4. В сетях с компенсацией емкостного тока степень несимметрии фазных напряжений не должна превышать 0,75 % фазного напряжения, а напряжение смещения нейтрали 15 % фазного напряжения. Допускается напряжение смещения нейтрали в течение 1 ч до 30 % и в течение времени поиска места замыкания на землю – 100 % фазного напряжения.

### III. Оценка эффективности устройств компенсации емкостного тока ОЗЗ

На рис. 1 представлены основные технические решения, предназначенные для компенсации негативных последствий воздействия токов ОЗЗ в сетях среднего напряжения.

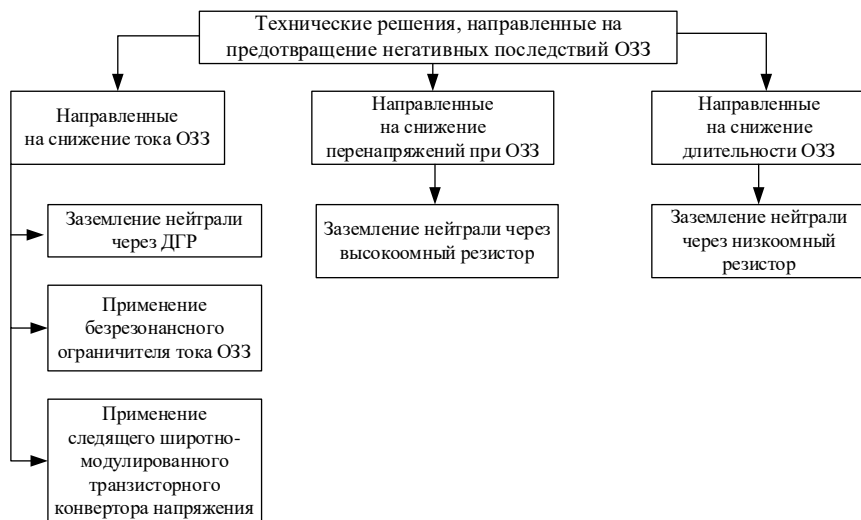


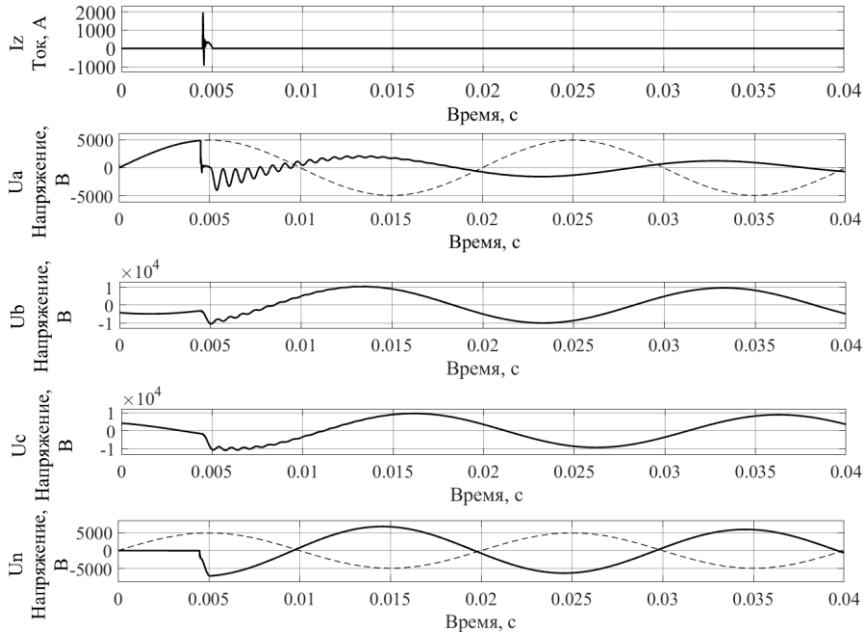
Рис. 1. Классификация устройств, предотвращающих негативные последствия ОЗЗ

Fig. 1. Classification of devices that prevent the negative effects of single-phase earth fault

Традиционно как в России, так и за рубежом для ограничения емкостных токов используются дугогасящие реакторы (ДГР) [5]. Устраняя ряд негативных факторов, создаваемых ОЗЗ, ДГР имеют определенные недо-

статки: высокую стоимость и необходимость перестройки ТП (трансформаторной подстанции); сложность настройки под емкость разветвленной сети с распределенными параметрами и организацию селективной защиты от ОЗЗ, так как ток замыкания компенсируется практически до нуля.

При феррорезонансной настройке сопротивление ДГР равняется полному емкостному сопротивлению сети ( $X_L = X_{C\Sigma}$ ). Осциллограммы токов и напряжений при однократном и двукратном пробое приведены на рис. 2 и 3.



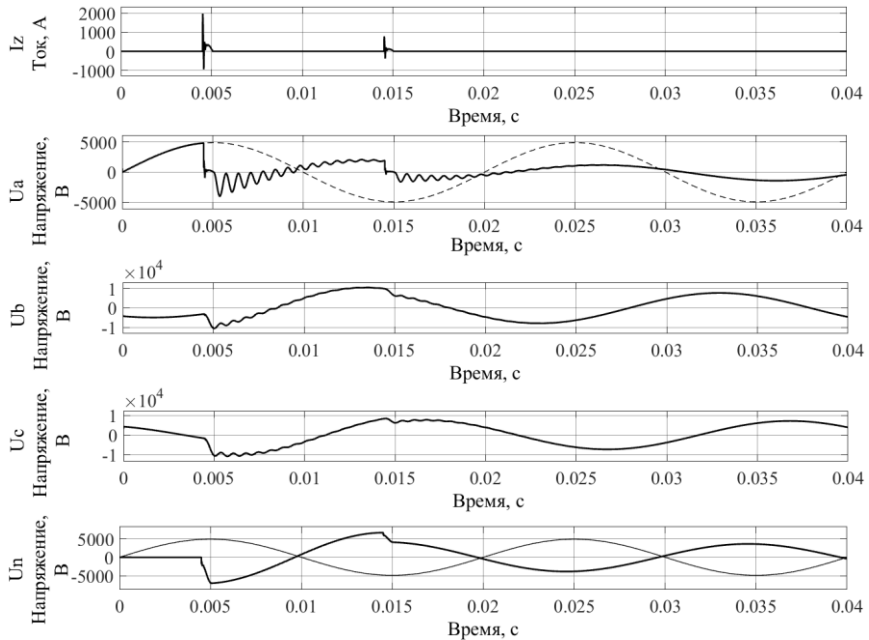
**Рис. 2. Процессы в сети с резонансно-заземленной нейтралью при однократном пробое изоляции:**

$I_z$  – ток ОЗЗ;  $U_a$  – напряжение поврежденной фазы А;  $U_b$  – напряжение неповрежденной фазы В;  $U_c$  – напряжение неповрежденной фазы С;  $U_n$  – напряжение в нейтральной точке

**Fig. 2. Processes in a network with a resonantly grounded neutral with a single insulation breakdown:**

$I_z$  – single-phase earth fault current;  $U_a$  – voltage of the damaged phase А;  $U_b$  – undamaged phase voltage В;  $U_c$  – the undamaged phase voltage С;  $U_n$  – voltage at the neutral point

Как видно из представленных выше осциллограмм, при полной компенсации емкостного тока кратность перенапряжений не изменяется при повторном пробое. После восстановления изоляции напряжение на нейтрали медленно снижается до нуля, при этом процесс является колебательным. Это обусловлено влиянием индуктивности ДГР и повышением порядка электрической цепи, описывающего ее дифференциальные уравнения.

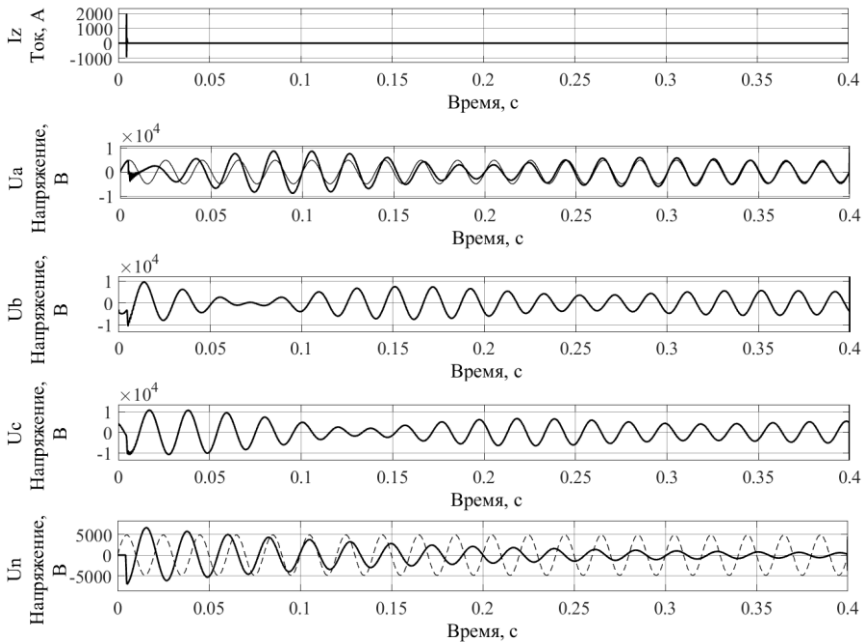


**Рис. 3. Процессы в сети с резонансно-заземленной нейтралью при двукратном пробое изоляции:**

$I_z$  – ток ОЗЗ;  $U_a$  – напряжение поврежденной фазы А;  $U_b$  – напряжение неповрежденной фазы В;  $U_c$  – напряжение неповрежденной фазы С;  $U_n$  – напряжение в нейтральной точке

**Fig. 3. Processes in a network with a resonantly grounded neutral with a double breakdown of insulation:**  
 $I_z$  – single-phase earth fault current;  $U_a$  – voltage of the damaged phase А;  $U_b$  – the voltage of the undamaged phase В;  $U_c$  – the voltage of the undamaged phase С;  $U_n$  – the voltage at the neutral point

При перекомпенсации емкостного тока напряжения на поврежденной и неповрежденных фазах изменяются по закону биений. Биения обусловлены тем, что частота тока промышленной частоты приблизительно равна частоте собственных колебаний напряжения на нейтрали сети; полуразность этих частот и определяет частоту огибающей кривой биения. Осциллограммы токов и напряжений в сети при 25 %-ной расстройке компенсации приведены на рис. 4 и 5.



**Рис. 4. Процессы в сети с 25 %-ной перекомпенсацией емкостного тока при однократном пробое**

**Fig. 4. Processes in the network with 25 % overcompensation of the capacitive current at a single breakdown**

Как видно из представленных ниже осциллограмм, при полной компенсации емкостного тока кратность перенапряжений не изменяется при повторном пробое. При частичной компенсации кратность перенапряжений увеличивается при повторном пробое.

Приведенные ниже опыты подтверждают необходимость постоянной автоматической настройки индуктивности ДГР в резонанс с емкостью сети.

Это требует сложного алгоритма управления, а также дополнительного оборудования.

#### IV. Применение ФПУ для компенсации токов ОЗЗ

В силу недостатков существующих технических средств компенсации емкостного тока ОЗЗ было предложено применить в качестве такого средства устройство на базе многообмоточных трансформаторов и тиристорных коммутаторов.

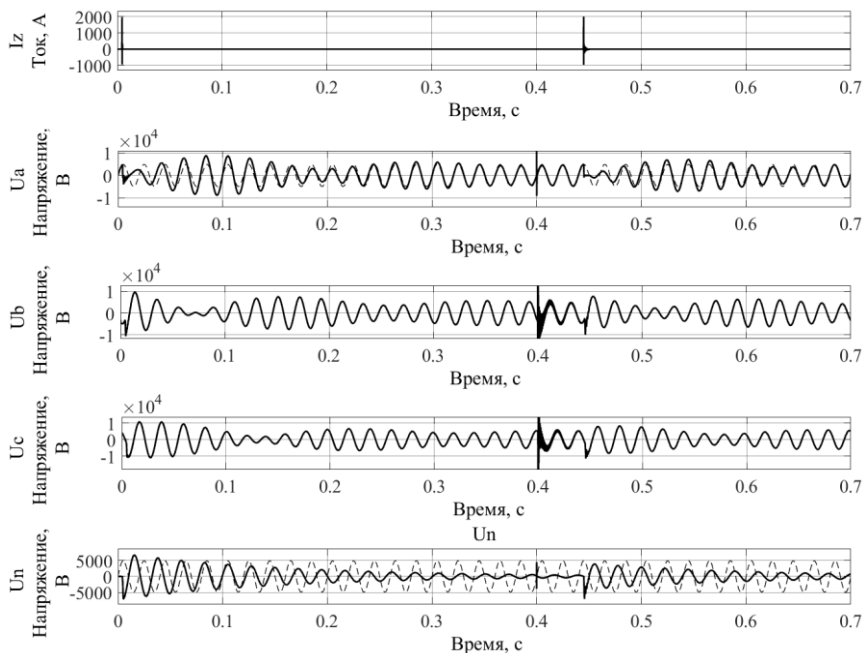


Рис. 5. Процессы в сети с 25 %-ной перекомпенсацией емкостного тока при двукратном пробое

Fig. 5. Processes in the network with 25 % overcompensation of the capacitive current at a double breakdown

Такой класс устройств известен как фазоворотные устройства (ФПУ) и является автоматическим средством поддержания требуемого режима работы сети. Эти устройства обычно используются в сетях напряжением 110 кВ и выше, поэтому была поставлена задача адаптации устройства и алгоритма управления для работы в составе распределительных сетей.

Принцип действия ФПУ заключается в создании дополнительной



комплексной вольтодобавки в месте его установки в составе энергосистемы [4, 6]. Интеграция ФПУ в состав электрической сети подразумевает автоматическое и своевременное регулирование параметров вольтодобавочного напряжения ФПУ в целях установления, либо поддержания требуемого режима работы. Реализация подобных функций подразумевает формирование соответствующих управляющих воздействий на ФПУ посредством интеллектуальных систем управления (СУ) при изменении параметров режима линии электропередачи. Таким образом, применение СУ, способных адаптировать свое управляющее воздействие к изменению параметров режима линии электропередачи, является необходимым условием для использования ФПУ в составе сети.

Как правило, ФПУ имеют в своем составе два трансформатора: шунтовой (ШТ) и серийный (СТ). За счет различной конфигурации соединения вторичных обмоток ШТ и первичных обмоток СТ (внутренней топологией построения ФПУ) обеспечивается необходимый угол сдвига фаз между входными и выходными цепями ФПУ.

Существует несколько вариантов топологии устройства. Для исследования выбрана схема с зависимым возбуждением и симметричным регулированием (рис. 6). Выбранная для исследования схема имеет преимущества по сравнению с другими схмотехническими вариантами построения ФПУ: во-первых, реализует симметричный способ регулирования, при котором величина выходного напряжения не зависит от угла формируемого фазового сдвига [7]; во-вторых, число тиристоров в составе коммутатора существенно меньше по сравнению с другими вариантами топологий ФПУ.

Вносимые в линию электропередач от ФПУ вольтодобавочные напряжения характеризуются изменением угла регулирования между входным и выходным напряжением ФПУ. Дискретное регулирование угла определяется заданием номера ступени регулирования. Номер ступени регулирования  $N_{ст}$  связан с углом регулирования следующим соотношением:

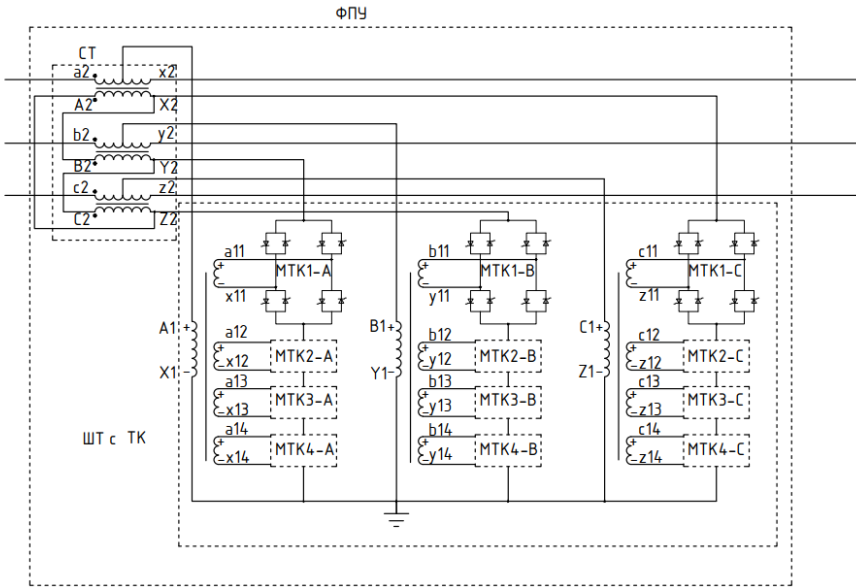
$$N_{ст} = \alpha \cdot \frac{N_{\max}}{\alpha_{\max}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – текущий угол регулирования,  $N_{\max}$  – максимальное количество ступеней регулирования и  $\alpha_{\max}$  – максимальный угол регулирования.

Коэффициент трансформации СТ  $K_2$  определяется отношением напряжений вентильной обмотки к сетевой. Минимальный коэффициент трансформации ШТ  $K_{1\min}$  равен отношению напряжения вентильной обмотки с наименьшим напряжением к сетевой:

$$K_{\text{лмин}} = \frac{U_{\text{a11x11}}}{U_{\text{лНОМ}}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{a11x11}}$  – напряжение самой низковольтной вентильной обмотки ШТ,  $U_{\text{лНОМ}}$  – номинальное фазное напряжение ВЛ.



**Рис. 6. Функциональная схема исследуемого устройства:**

ШТ – шунтовой трансформатор, СТ – серийный трансформатор, ТК – тиристорный коммутатор, ФПУ – фазоворотное устройство

**Fig. 6. Functional diagram of the device under study:**

ШТ – shunt transformer, СТ – serial transformer, ТК – thyristor switch, ФПУ – phase-reversal device

Тиристорный коммутатор в процессе регулирования фазового угла подключает определенным способом вентильные обмотки ШТ к вентильным обмоткам СТ. Можно ввести эквивалентный коэффициент  $K_1$ , который по сути является суммарным эквивалентным коэффициентом трансформации вентильных обмоток ШТ, и вычисляется следующим образом:

$$K_1 = K_{\text{лмин}} \cdot N_{\text{ст}}. \quad (3)$$

Каждый мост в составе ТК может находиться в следующих состояниях:

- 1) режим 0 – шунтирование вторичной (вентильной) обмотки ШТ;
- 2) режим 1 – подключение вторичной (вентильной) обмотки ШТ в прямом направлении;
- 3) режим –1 – подключение вторичной (вентильной) обмотки ШТ в обратном направлении.

Управление осуществляется по ключевым способом, при котором импульсы управления постоянно поступают на два встречно включенных тиристора одновременно. При заданной ступени регулирования импульсы управления, поступающие на тиристорные ключи, не меняются, что говорит о простоте управления в статическом режиме.

### V. Имитационное моделирование устройства

В ходе исследования была создана имитационная модель сети и внедренного в ее состав ФПУ с мостовым соединением ключей (упрощенная модель тиристорного коммутатора) (рис. 8) в соответствии с принципиальной схемой (рис. 7).

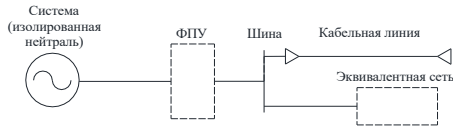


Рис. 7. Принципиальная схема сети с изолированной нейтралью

Fig. 7. Principal diagram of a network with an isolated neutral

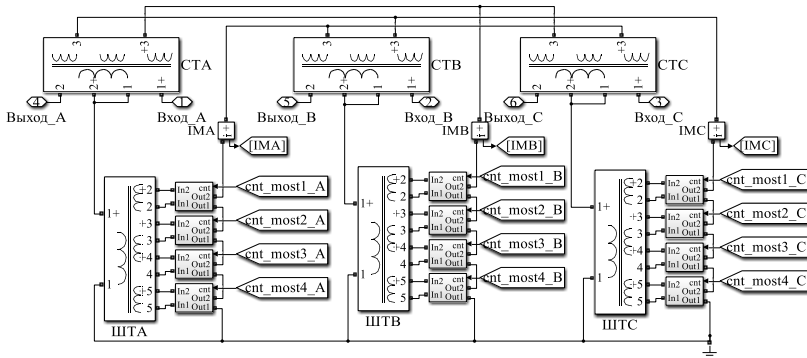


Рис. 8. Имитационная модель ФПУ в MatLab

Fig. 8. Simulation model of phase-reversal device in MatLab

На рис. 9 изображена полная модель сети с включенным в ее состав разработанным устройством.

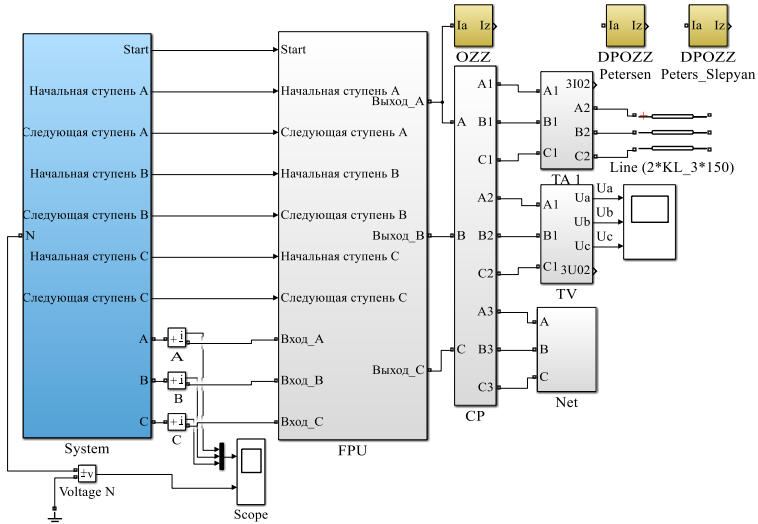


Рис. 9. Имитационная модель сети с разработанным устройством

Fig. 9. Simulation model of the network with the developed device

## VI. Результаты экспериментов

Для первого опыта принято время замыкания ключа ОЗЗ равным 0,3 с и время размыкания 0,5 с. ОЗЗ моделируется на фазе А. Результаты моделирования представлены на рис. 10.

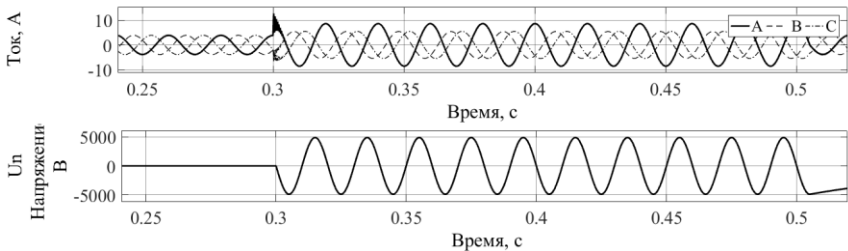
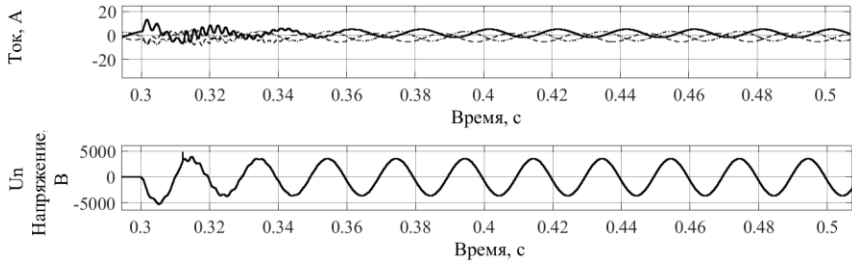


Рис. 10. Ток фаз и напряжение смещения нейтрали при устойчивом ОЗЗ фазы А

Fig. 10. Phase current and neutral offset voltage at stable phase A single-phase earth fault

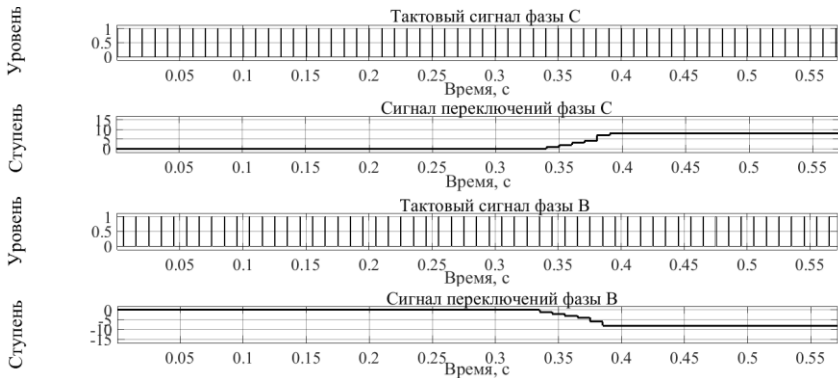
Из полученных осциллограмм видно, что действующее значение тока поврежденной фазы составило 7 А, что неприемлемо для условия самопогасания электрической дуги.

Можно сделать вывод о необходимости включения в сеть устройства компенсации. Результаты моделирования представлены на рис. 11-12.



**Рис. 11. Ток фаз и напряжение смещения нейтрали при устойчивом ОЗЗ фазы А (в сеть подключено ФПУ)**

**Fig. 11. Phase current and neutral offset voltage at stable phase A single-phase earth fault (phase-reversal device is connected to the network)**



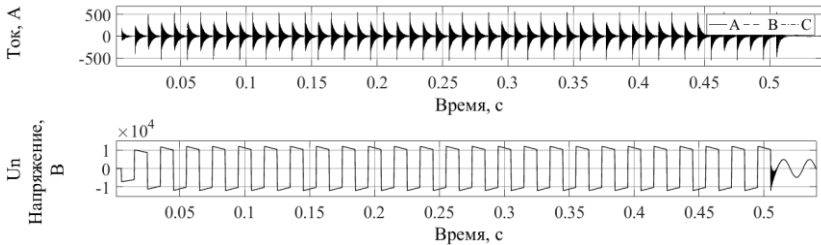
**Рис. 12. Сигналы переключений ступеней фаз**

**Fig. 12. Phase stage switching signals**

Подключение разработанного устройства помогает снизить действующее значение тока ОЗЗ до значения чуть более 3 А. Также установлено положительное воздействие ФПУ на смещение нейтрали, возникающее при ОЗЗ из-за просадки напряжения поврежденной фазы. Подключение устройства компенсации снижает смещение нейтрали с отметки 4 до 3 кВ.

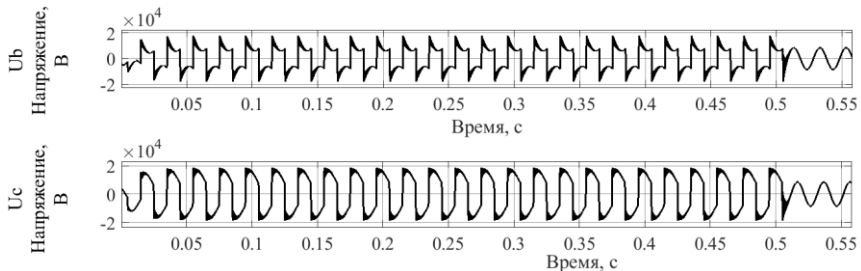
При данной конфигурации и параметрах сети алгоритм «верхнего уровня» переключает обмотки ШТ до уровня 8 ступень (фаза В) и -8 ступень (фаза С). При данном управляющем воздействии обеспечивается достаточный уровень компенсации для условия самопогасания электрической дуги.

Для следующего опыта принята следующая последовательность моментов замыкания и размыкания ключа ОЗЗ: от 0,005 с до 0,505 с, шаг равен 0,0098 с. ОЗЗ моделируется на фазе А. Результаты моделирования представлены на рис. 13-14.



**Рис. 13. Ток фаз и напряжение смещения нейтрали при дуговом прерывистом ОЗЗ фазы А**

**Fig. 13. Phase current and neutral offset voltage at phase A arc intermittent single-phase earth fault**



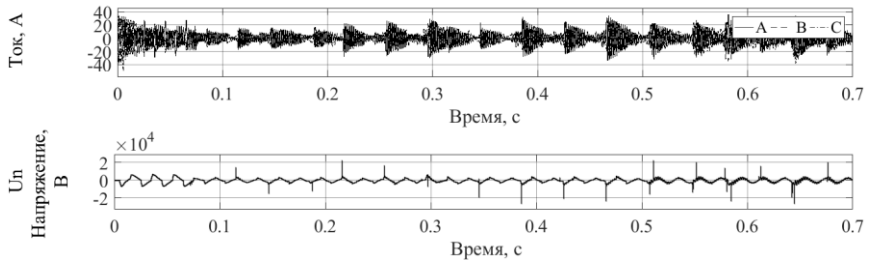
**Рис. 14. Напряжение неповрежденных фаз при дуговом прерывистом ОЗЗ фазы А**

**Fig. 14. Voltage of undamaged phases with phase A arc intermittent single-phase earth fault**

При повторных пробоях броски тока увеличивают свое значение. Действующее значение тока на промежутке от начала до конца дугового прерывистого ОЗЗ доходит до 109 А, после снятия ОЗЗ ток фазы А снижается до 6 А, но это все еще не ток нормального режима. Так же отмечено возникновение значительных перенапряжений на неповрежденных фазах.

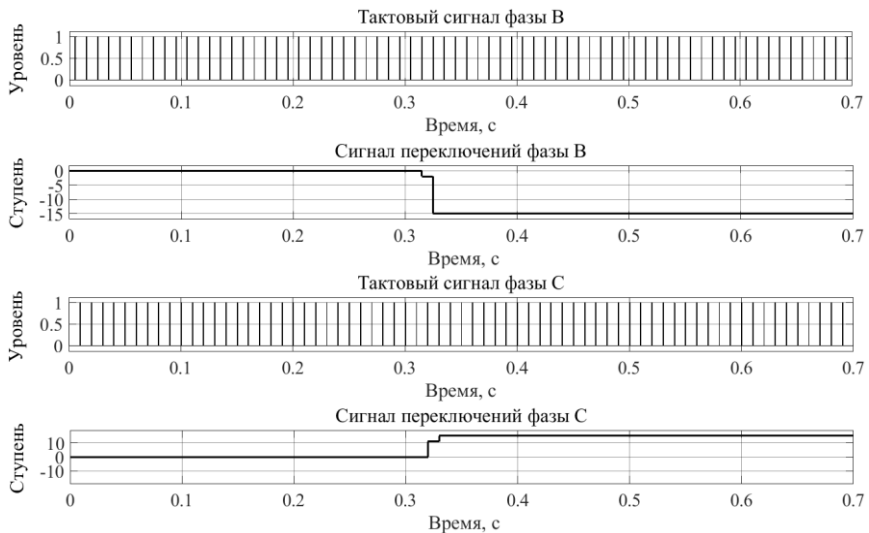
Действующее значение напряжения достигает 8,5 кВ. Действующее значение напряжения смещения нейтрали составляет 10,65 кВ.

Влияние разработанного устройства на данный режим сети представлено на рис. 15-17.



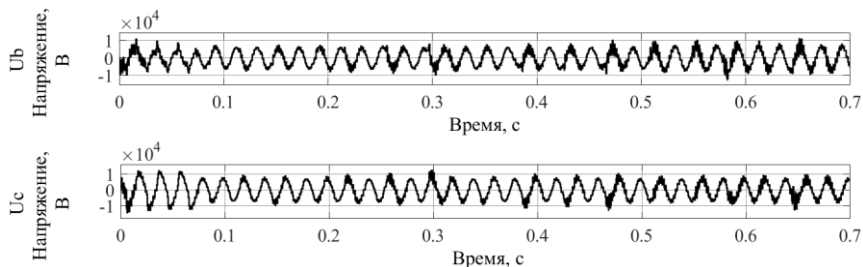
**Рис. 15. Ток фаз и напряжение смещения нейтрали при дуговом прерывистом ОЗЗ фазы А (в сеть подключено ФПУ)**

**Fig. 15. Phase current and neutral offset voltage with phase A arc intermittent single-phase earth fault (phase-reversal device is connected to the network)**



**Рис. 16. Сигналы переключений ступеней фаз**

**Fig. 16. Phase stage switching signals**



**Рис. 17. Напряжение неповрежденных фаз при дуговом прерывистом ОЗЗ фазы А (в сеть подключено ФПУ)**

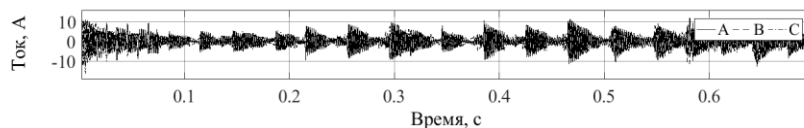
**Fig. 17. Voltage of undamaged phases with phase A arc intermittent single-phase earth fault (phase-reversal device is connected to the network)**

Как можно видеть из полученных осциллограмм, алгоритм переключает ступени устройства в крайние точки диапазона регулирования: 15 ступень фазы С, -15 ступень фазы В. При данном управляющем воздействии действующее значение тока поврежденной фазы снижается до 9 А. Напряжение нейтрали снижается до 2,617 кВ. Перенапряжения на неповрежденных фазах также снижаются. Действующее значение напряжения на неповрежденных фазах составляет 4,269 кВ. Видно, что устройство не выдает команду «Сброс» по окончании ОЗЗ в сети. Данное явление можно объяснить тем, что ток фазы А после снятия ОЗЗ остается на уровне 6 А без включения устройства. Алгоритм принимает данное значение тока за аварийный режим и не сбрасывает ступени в нулевое значение.

Отмечено положительное влияние разработанного устройства на режим сети, однако при данном диапазоне регулирования устройства в случае дугового прерывистого ОЗЗ не выполняется условие самопогасания электрической дуги. Возникшую проблему можно решить при помощи расширения диапазона регулирования. Для этого требуется добавить дополнительную обмотку ко вторичным обмоткам ШТ. Также следует расширить модель дешифратора, добавив дополнительные ступени в таблицу истинности. Результат моделирования представлен на рис. 18.

Увеличение диапазона регулирования позволяет снизить ток в месте замыкания до 3,491 А, что удовлетворяет условию самопогасания электрической дуги.





**Рис. 18. Ток фаз при дуговом прерывистом ОЗЗ фазы А  
(в сеть подключено ФПУ)**

**Fig. 18. Phase current at phase A arc intermittent single-phase earth fault  
(phase-reversal device is connected to the network)**

### Заключение

Исходя из данных, полученных в процессе моделирования, можно говорить о достаточной эффективности разработанного устройства. Полученного диапазона регулирования (от  $-15$  до  $15$  ступени) достаточно для обеспечения снижения тока в месте замыкания до значения, удовлетворяющего условию самопогасания электрической дуги в случае устойчивого замыкания на землю.

В случае дугового прерывистого замыкания на землю диапазона от  $-15$  до  $15$  ступени недостаточно для снижения тока в месте замыкания ниже  $5$  А, поэтому необходимо расширение диапазона до  $\pm 24$  ступеней.

© Слузова А.В., 2023

© Лоскутов А.А., 2023

*Поступила в редакцию 09.08.2022*

*Принято к публикации 06.12.2023*

*Received 09.08.2022*

*Accepted 06.12.2023*

### Библиографический список

- [1] Шуин В.А., Шадрикова Т.Ю., Добрягина О.А., Шагурина Е.С. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов, Пат. 2688210 RU, заявл. 16.07.18; опубли. 21.05.19. – Бюл. № 15.
- [2] Титенков С.С., Пугачев А.А. Режимы заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю // Энергоэксперт. 2010. № 2. С. 18-25.
- [3] РД 34.20.179. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ. СПО Союзтехэнерго № 1988, 2009. – 26 с.
- [4] Панфилов Д.И., Рашитов П.А., Ремизевич Т.В., Стельмаков В.Н. Фазоповоротное устройство. Пат. 107005 RU, МПК H02M 5/00, заявл. 25.03.2011; опубли. 27.07.2011. – Бюл. № 21.

- [5] Осипов Д.С., Киселев Б.Ю., Планков А.А., Янишевская А.Г. Обзор современных средств и методов компенсации емкостных токов в сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 274.
- [6] Гринштейн Б.Н., Толстов Ю.Г. Регулирование фазы вектора напряжения сети вентильным фазопоротным устройством // Электричество. 1992. № 2. С. 55-60.
- [7] Рожков А.Н., Ремизевич Т.В., Рашитов П.А. Исследование режимов работы мостового тиристорного коммутатора переменного тока при повентильном способе управления // Сборник статей Международ. научн.-практ. конф. Т. 2., Февраль 07, 2014, Уфа, Россия: Башкирский государственный университет (Уфа), 2014. С. 107-111.
- [8] Правила устройства электроустановок. Введ. 2003-01-01. М.: КНОРУС, 2014. – 488 с.
- [9] Веселов А.Е., Невретдинов Ю.М., Ярошевич В.В., Кабеев И.Е., Фастий Г.П., Токарева Е.А. Разработка технических мероприятий по компенсации емкостных токов замыкания на землю и ограничению перенапряжений в промышленных распределительных электрических сетях // Вестник МГТУ. Труды мурманского государственного технического университета. 2017. Т. 10. № 4. С. 527-532.
- [10] Panfilov D.I., Rozhkov A.N., Astashev M.G. Controlled phase shifters model for power grid operating modes calculation // 2016 IEEE 16 International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Jun. 07-10, 2016, Florence, Italy: IEEE, 2016. P. 118-122. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555654
- [11] Жмуров В.П., Стельмаков В.Н., Тарасов А.Н., Тимошенко А.Л., Казеннова И.И. Полупроводниковое фазопоротное устройство. Пат. 2450420 RU, заявл. 13.05.2011; опубл. 10.05.2012. – Бюл. № 13.
- [12] Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ // Энергетик. 2001. № 11 (35). С. 104.
- [13] Шуин В.А., Мартынов В.Л., Шагурина Е.С., Шадрикова Т.Ю. Максимальные токовые защиты от замыканий на землю на основе высших гармоник для компенсированных кабельных сетей 6-10 кВ // Электротехника. 2018. № 1. С. 62-72.
- [14] Тютиков В.В., Кутумов Ю.Д., Шадрикова Т.Ю., Шуин В.А. Динамическая устойчивость функционирования токовых направленных защит от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. № 6. С. 30-41. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.6.030-041
- [15] Шуин В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ // Электричество. 1991. № 10. С. 58-61.

## References

- [1] V.A. Shuin, T.Yu. Shadrikova, O.A. Dobrynina and E.S. Shagurina, “*Ustrojstvo zashchity ot odnofaznyh замыканий na zemlyu v setyah s izolirovannoj neytral’yu i s kompensaciej yomkostnyh tokov* [Protection device against single-phase earth faults

- in networks with isolated neutral and with compensation of capacitive currents*”], Patent RU 2688210, May 21, 2019 (in Russian).
- [2] S.S. Titenkov and A.A. Titenkov, “Rezhimy zazemleniya nejtrali v setyah 6-35 kV i organizatsiya relejnoj zashchity ot odnofaznyh zamykanij na zemlyu [Neutral grounding modes in 6-35 kV networks and organization of relay protection against single-phase earth faults]”, *Energoexpert*, no. 2, pp. 18-25, 2010.
  - [3] Tipovaya instrukciya po kompensacii emkostnogo toka zamykaniya na zemlyu v elektricheskikh setyah 6-35 kV. RD 34.20.179. [Standard instruction for compensation of capacitive earth fault current in 6-35 kV electrical networks. RD 34.20.179.], 2009 (in Russian).
  - [4] D.I. Panfilov, P.A. Rashitov, T.V. Remizevich and V.N. Stelmakov, “Fazopovorotnoe ustrojstvo [Phase shifting device]”, Patent RU 107005, Jul. 27, 2011 (in Russian).
  - [5] D.S. Osipov, B. Yu. Kiselev, A.A. Plankov and A.G. Yanishevskaya, Reciev of modern means and methods of capacitive current compensation in networks of 6-35 kv with isolated neutral, *Modern problems of science and education*, no. 6, pp. 274, 2014.
  - [6] B.N. Grinstein and Yu.G. Tolstov, “Regulirovanie fazy vektora napryazheniya seti ventil'nym fazopovorotnym ustrojstvom [Regulation of the phase of the voltage vector of the network by a valve phase-shifting device]”, *Electricity*, no. 2, pp. 55-60, 1992 (in Russian).
  - [7] A.N. Rozhkov, T.V. Remizevich and P.A. Rashitov, “Issledovanie rezhimov raboty mostovogo tiristorного kommutatora peremennogo toka pri poventil'nom sposobe upravleniya [Investigation of the operating modes of a bridge thyristor alternating current switch with a valve-by-valve control method]”, in proc. *Sbornik statej Mezhdunarod. nauchn.-prakt. konf. T. 2 [Collection of articles of International. scientific-practical conf. T. 2]*, Feb. 07, 2014, Ufa, Russia, pp. 107-111 (in Russian).
  - [8] Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations], 2014 (in Russian).
  - [9] A.E. Veselov, Yu.M. Nevretdinov, V.V. Yaroshevich, I.E. Kabiev, G.P. Fasti, E.A. Tokareva, “Razrabotka tekhnicheskikh meropriyatij po kompensacii emkostnyh tokov zamykaniya na zemlyu i ogranicheniyu perenapryazhenij v promyshlennyh raspredelitel'nyh elektricheskikh setyah [Development of technical measures to compensate for capacitive earth fault currents and limit overvoltage in industrial distribution electrical networks]”, *Vestnik MSTU. Proceedings of the Murmansk State Technical University*, vol. 10, no. 4, pp. 527-532, 2007 (in Russian).
  - [10] D.I. Panfilov, A.N. Rozhkov, M.G. Astashev, “Controlled phase shifters model for power grid operating modes calculation”, in proc. *2016 IEEE 16 International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Jun. 07-10, 2016, Florence, Italy, pp. 118-122. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555654
  - [11] V.P. Zhmurov, V.N. Stelmakov, A.N. Tarasov, A.L. Timoshenko A.L. and I.I. Kazennova, “Poluprovodnikovoe fazopovorotnoe ustrojstvo [Semiconductor phase shifter]”, Patent RU 2450420, May 10, 2012 (in Russian).
  - [12] V.A. Shuin and A.V. Gusenkov, “Zashchity ot zamykanij na zemlyu v elektricheskikh setyah 6-10 kV [Protection against ground faults in electrical networks 6-10 kV], *Energetik*, vol. 11, no. 35, p. 104, 2001 (in Russian).

- [13] V.A. Shuin, V.L. Martynov, E.S. Shagurina and T.Yu. Shadrikova, "Overcurrent protection from earth faults based on higher harmonics for compensated 6- to 10-kv cable networks", *Electrical engineering*, no. 1, pp. 62-72, 2018.
- [14] V.V. Tyutikov, Yu.D. Kutumov, T.Yu. Shadrikova and V.A. Shuin, "Dynamic stability of the functioning of current earth fault directional protection in networks with isolated neutral", *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*, vol. 6, pp. 30-41, 2019. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.6.030-041
- [15] V.A. Shuin, "Nachal'nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo processa pri замыкaniyah na zemlyu v kabel'nyh setyah 6-10 kV [Initial phase ratios of the electrical values of the transient process during earth faults in cable networks 6-10 kV]", *Electricity*, no. 10, pp. 58-61, 1991 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Слузова Анастасия Владимировна**, ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Anastasiya V. Sluzova**, assistant of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Лоскутов Антон Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Anton A. Loskutov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation