ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.315.1: 621.316.9

Анализ основных режимов нейтрали распределительных сетей 6–35 кВ с использованием моделирования однофазных замыканий

В.А. Шишкалов[1], В.Э. Левчук[1,2]

[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[2] Филиал ПАО «Россети» — Ростовское ПМЭС, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты начального этапа исследования режимов нейтрали в распределительных сетях напряжением 6–35 кВ. Изложены ключевые области, в которых проводятся исследования по данной теме, а также выполнен сравнительный анализ основных режимов заземления нейтрали в распределительных сетях. Эффективно представлена модель участка сети, разработанная в программном комплексе Matlab Simulink. В качестве результатов работы выделены актуальные направления дальнейшего развития исследования, а также проблемы, связанные с эволюцией этой области.

Ключевые слова: распределительная сеть, нейтраль, режим нейтрали, модель, изолированная нейтраль, компенсированный режим нейтрали

Для цитирования. Шишкалов В.А., Левчук В.Э. Анализ основных режимов нейтрали распределительных сетей 6-35 кВ с использованием моделирования однофазных замыканий. *Молодой исследователь Дона.* 2025;10(2):17–22.

Analysis of the Neutral Point Main Modes in 6–35 kV Distribution Networks by Modeling Single Phase-to-Earth Fault

Vadim A. Shishkalov[1], Vladimir E. Levchuk[1,2]

[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Branch of PJSC “Rosseti”, Rostov Enterprise of Main Electric Networks, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of the initial stage of the research on neutral point modes in 6–35 kV distribution networks. The key directions of research currently ongoing on this topic have been outlined, and a comparative analysis of the neutral point main grounding modes in distribution networks has been carried out. A model of a network section has been created in the Matlab Simulink software package and successfully presented. As a result of the study, relevant areas for further research, as well as problems hindering progress in this area, have been distinguished.

Keywords: distribution network, neutral point, neutral point mode, model, isolated neutral mode, compensated neutral mode

For Citation. Shishkalov VA, Levchuk VE. Analysis of the Neutral Point Main Modes in 6–35 kV Distribution Networks by Modeling Single Phase-to-Earth Fault. *Young Researcher of Don*. 2025;10(2):17–22.

Введение. Распределительные электрические сети напряжением 6–35 кВ являются важной частью электросетевого комплекса Российской Федерации, поскольку они обеспечивают передачу электроэнергии от магистральных сетей к питающим потребителям, включая трансформаторные пункты. В связи с этим любые повреждения или отключения в распределительных сетях приводят к более частой потере электроэнергии для потребителей, чем это происходит в сетях более высокого напряжения.

Обеспечение надежности работы сетей данного напряжения стало важной задачей, что нашло отражение в их режиме нейтрали — изолированном или компенсационном. Несмотря на преимущества этих режимов, существуют также очевидные недостатки, что привело к значительному количеству исследовательских работ, как практического, так и теоретического характера.

© Шишкалов В.А., Левчук В.Э., 2025

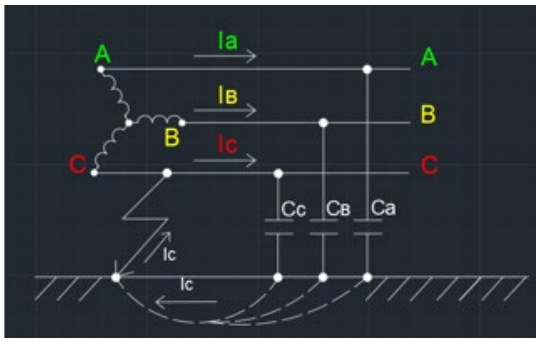
Исследования режимов нейтрали распределительных сетей охватывают широкий круг задач, включая моделирование переходных процессов при однофазных замыканиях на землю [1–3], влияние режима нейтрали на величину перенапряжений при однофазных повреждениях и, как следствие, на требования к изоляции электрооборудования [3, 4], возможность возникновения явления феррорезонанса при дуговых однофазных замыканиях на землю [5], определение места повреждения при однофазных замыканиях [6], обеспечение электробезопасности при попадании персонала под «напряжение прикосновения» в случае повреждения одной из фаз на землю [7, 8], изучение условий гашения дуги в месте повреждения линий [9], определение параметров устройств компенсации емкостных токов при однофазных замыканиях [7], регулирование величины компенсации емкостных токов при повреждении одной фазы на землю [10], организацию защит от однофазных повреждений отходящих присоединений с высокой степенью селективности и чувствительности [11, 12], общее сравнение эффективности применения различных режимов нейтрали [13, 14], оценку стоимости организации разных режимов нейтрали [15], анализ обеспечения надежности работы сети в различных режимах нейтрали [16], отказ от изолированного и компенсационного режимов в пользу глухозаземленного (по аналогии с сетями более высокого напряжения) [17], определение критериев выбора оптимального режима заземления [14], обмен опытом эксплуатации распределительных сетей с резистивным режимом нейтрали [12, 18].

Представленный перечень свидетельствует о высокой актуальности проведения исследований в данной области и подчеркивает основную проблему таких сетей — простое однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). Целью данной работы является обобщение результатов ранее проведенных исследований авторами [19] и сравнение их с результатами других исследовательских работ, а также формирование дальнейших направлений исследования этой темы на основе обобщения имеющихся фактов и данных.

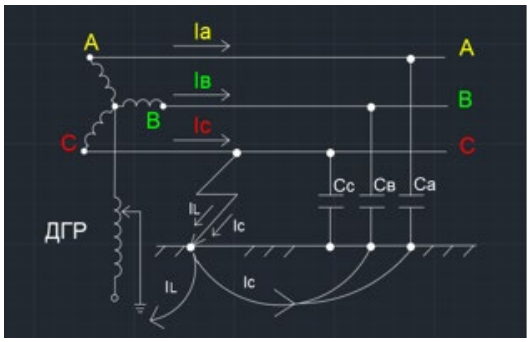
Различия между режимами нейтрали. Как указывалось в работе [19], на территории России можно выделить три варианта реализации режима нейтрали в распределительных сетях 6–35 кВ: изолированный режим, заземление через индуктивное сопротивление и заземление через резистивное сопротивление. Источник [17] объясняет выбор этих режимов особенностями конструкции оборудования, разработанного в прошлом веке, параметрами аварийных режимов, требованиями к нагрузочному оборудованию и экономической целесообразностью.

Поскольку основные проблемы этих сетей связаны с ОЗЗ, сравнение режимов нейтрали проводится именно в контексте этого аварийного режима. В представленной схеме (рис. 1 *а*) изображен участок распределительной сети с изолированной нейтралью и ОЗЗ. Под изолированной нейтралью понимается нейтраль трансформатора или генератора, не соединенная с заземляющим устройством или соединенная с ним через большое сопротивление, которое присутствует в приборах сигнализации, измерения, защиты и других аналогичных устройствах.

Таким образом, при повреждении одной из фаз на землю ток протекает через землю и емкостную проводимость неповрежденных фаз (рис. 1 *а*). К недостаткам такого режима обычно относят возможность перехода однофазного замыкания в двухфазное или даже трехфазное, сложности в организации защит и выявлении поврежденного фидера, а также риск возникновения феррорезонанса. Более того, в месте повреждения возникает перемежающаяся дуга, которая является неустойчивой, то есть периодически гаснет и вновь зажигается. Это явление, наряду с наличием индуктивности и емкости в сети, приводит к увеличению емкостного тока. В результате может происходить перенапряжение, которое достигает 2,5–3,5 от Uф. Такие перенапряжения наносят серьезный ущерб всей электрической сети и снижают ее изоляционные характеристики.

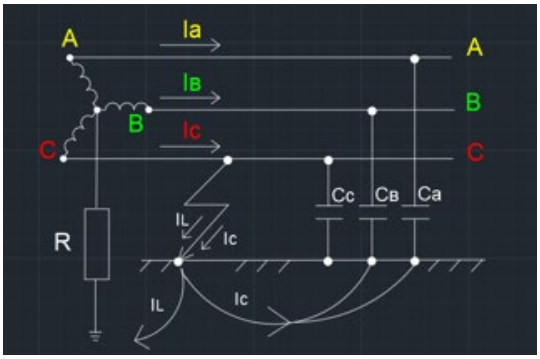


а)



б)

https://mid-journal.ru



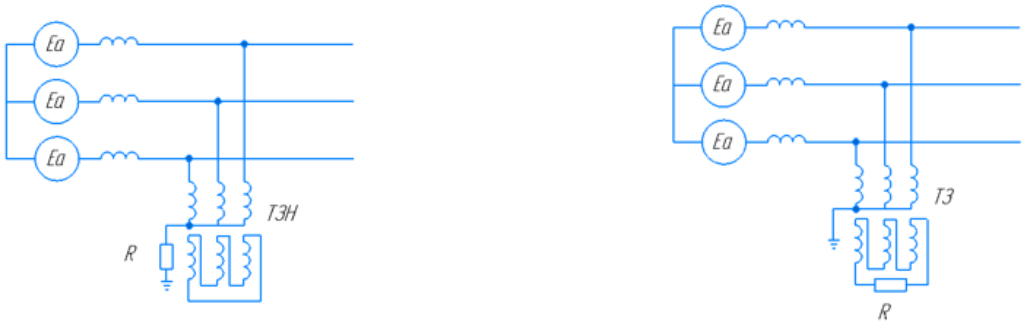
в)

Рис. 1. Схемы распределительной сети с однофазным замыканием на землю: *а* — с изолированным режимом нейтрали; *б* — с компенсированным режимом нейтрали через дугогасящий реактор; *в* — с компенсированным режимом нейтрали через резистивное сопротивление [19]

Поскольку возникающая дуга в месте повреждения зависит от емкостного тока, для борьбы с этим явлением был реализован режим нейтрали через индуктивное сопротивление или с использованием дугогасящего реактора (ДГР) (рис. 1 *б*). Однако в процессе эксплуатации распределительной сети ее конфигурация может изменяться: число присоединений может увеличиваться или уменьшаться в результате переключений и реконструкций, что, соответственно, влияет на величину емкости сети. В таком случае первоначальная настройка ДГР становится нецелесообразной, что приводит к увеличению емкостных токов и перенапряжения в участке сети, достигающего 2,4–3,0 от Uф. Таким образом, недостатком такого режима работы нейтрали является его «негибкость», что имеет большое значение для надежности электроснабжения. Это создает необходимость в устройстве для регулирования величины компенсации.

Кроме того, подобный режим нейтрали не решает проблему организации защит. Третий режим нейтрали — резистивное заземление, предназначен для ограничения емкостных токов, дуговых перенапряжений и феррорезонансных явлений при обеспечении работоспособности сети на время поиска и устранения повреждений оперативным персоналом.

Уменьшение емкостного тока в сети с таким режимом нейтрали достигается за счет сокращения времени разряда емкостей неповрежденных фаз, что обеспечивается специальным подключенным резистором, который уменьшает протекание тока нулевой последовательности. Резистор подключается к сети с помощью трансформатора, соединенного по схеме Y/Δ, одним из двух способов: первый способ предполагает подключение резистора между нулевой точкой обмотки высокого напряжения трансформатора и контуром заземления (рис. 2); второй способ заключается в том, что нейтраль обмотки высокого напряжения соединяется с землей, а резистор включается во вторичную обмотку трансформатора в конфигурации разомкнутого треугольника (рис. 2 *б*).



а) *б)*

Рис. 2. Способы подключения резистора к нейтрали сети согласно СТО «ВНИИГАЗ»

Моделирование замыкания в условиях разных режимов нейтрали. С целью оценки влияния режима нейтрали на величину емкостных токов при ОЗЗ авторами были собрана имитационная модель в программном комплексе MatlabSimulink.

Посредством данной модели были смоделированы 4 режима:

– нормальный режим работы сети;

– ОЗЗ фазы «А» при режиме изолированной нейтрали;

– ОЗЗ фазы «А» при режиме компенсированной нейтрали через ДГР;

– ОЗЗ фазы «А» при режиме компенсированной нейтрали через резистор;

https://mid-journal.ru

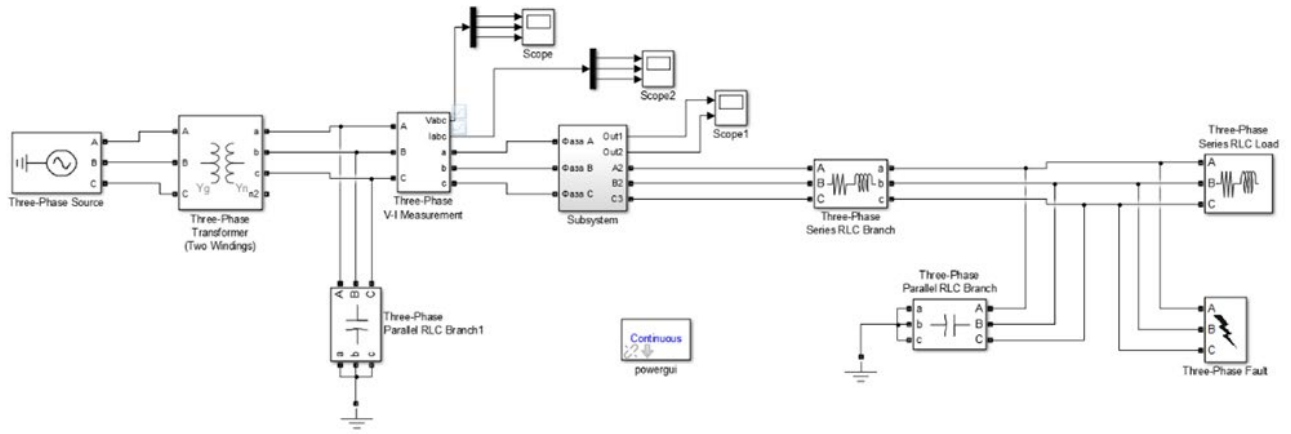


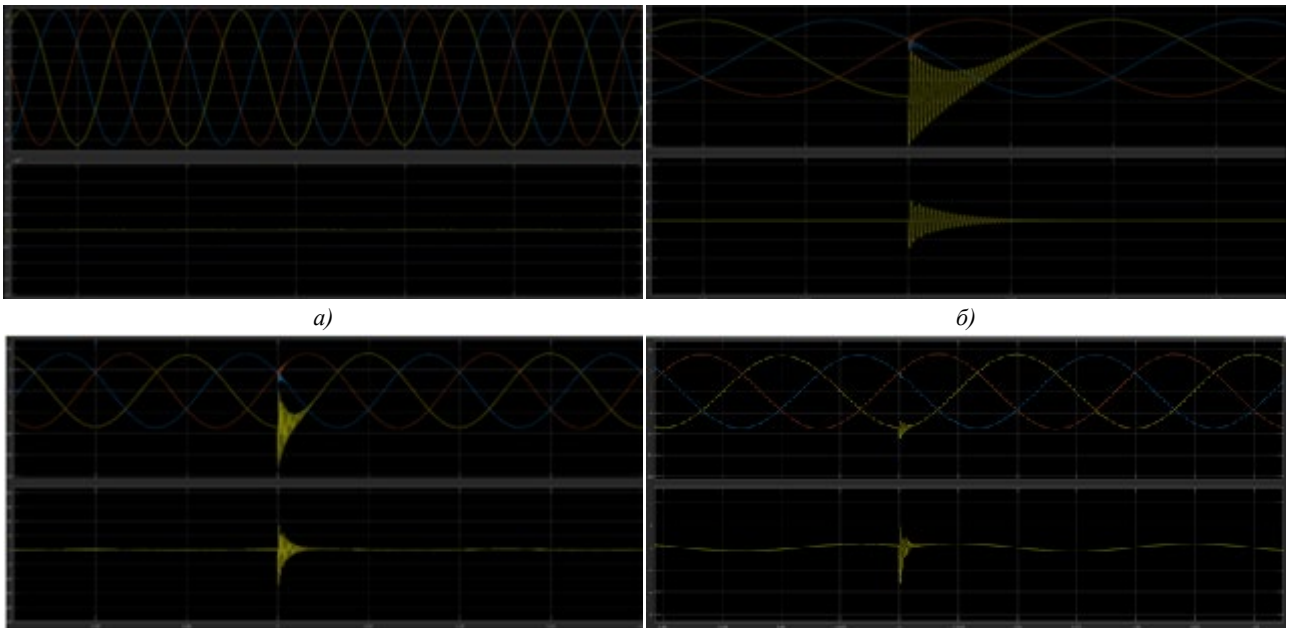
Рис. 3. Модель изучаемой сети, выполненная в программный комплекс MatlabSimulink

Результаты моделирования представлены на рис. 4. По данным осциллограммы видно, что применение компенсирования в нейтрали значительно уменьшает емкостный ток в поврежденной фазе «А» по сравнению с изолированным режимом нейтрали. При этом резистивное компенсирование выполняет эту задачу с большей эффективностью.

Анализ полученных результатов показывает, что представленный анализ режимов нейтрали распределительной сети и сформированная модель являются первичными результатами исследования в данной области. Несмотря на необходимость доработки модели, результаты не противоречат существующей теории и исследованиям других авторов. Дальнейшая работа над моделью должна быть сосредоточена на расширении объема моделируемой сети, переходя от фрагмента сети к распределительному пункту с несколькими фидерами, а также на возможностях моделирования более сложных режимов нейтрали, таких как комбинированный и низкоомный.

Также, согласно источнику [17], для формирования более полного анализа возможной работы данных сетей следует рассмотреть однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) при их нестандартном режиме — глухо-заземленном. Это позволит также оценить целесообразность применения подобного режима в распределительных сетях.

Что касается эффективности применения режимов нейтрали, то явным преимуществом обладает резистивное заземление, что также подтверждают результаты исследований [2, 8, 13, 14, 18]. При этом стоит отметить отсутствие нормативно-технической документации, касающейся проектирования и эксплуатации сетей с таким режимом нейтрали у профильных электросетевых организаций.



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 4. Осциллограммы емкостных токов: *а* — в нормальном режиме работы; *б* — при замыкании фазы А на землю и изолированной нейтрали; *в* — при замыкании фазы А на землю и компенсации посредством ДГР; *г* — при замыкании фазы А на землю и через активное (резистивное) сопротивление

Большая часть исследований, в которых представлены результаты эксплуатации подобных режимов, опирается на опыт не электросетевых компаний, а компаний-потребителей электроэнергии, преимущественно из нефтегазовой и горнодобывающей отраслей. Эта осторожность со стороны крупных сетевых организаций указывает на то, что в исследовательских работах не учитываются некоторые эксплуатационные особенности. В частности, такие факторы, как топология сети, внешняя среда прохождения линий и наличие ресурсов для переключения и резервирования электроснабжения, часто остаются вне поля зрения.

Дополнительно стоит отметить малое количество исследований, посвященных экономическому обоснованию эффективности различных режимов нейтрали, что является ключевым инструментом принятия решений в современной экономике. В результате, распределительные сети в значительной степени продолжают эксплуатироваться с изолированным режимом нейтрали.

Заключение. Были выявлены основные направления исследований в данной предметной области. Проведено сравнение трех основных режимов нейтрали в распределительных сетях с детализированным описанием их отличительных черт. Также была сформирована модель участка распределительной сети с возможностью моделирования однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) при различных режимах нейтрали. Полученные в ходе моделирования осциллограммы не противоречат аналогичным исследованиям других авторов. Кроме того, определены направления для дальнейших исследований по развитию существующей модели. Предположены причины, из-за которых существуют проблемы с интеграцией накопленного опыта по использованию резистивного заземления, которые следует учитывать в будущих исследованиях по данной теме.

Список литературы

1. Владимиров Л.В., Иванов Г.В., Кислицин Е.Ю., Владимиров Л.В. Влияние переходного сопротивления при однофазном замыкании на землю в сети с резистивным заземлением нейтрали. *Вестник кибернетики*. 2022;1(45):16–22. https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-1-16-22

2. Каминский М.В., Добродей А.О. Моделирование перенапряжений. *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого.* 2022;(3):72–80.

3. Шуин В.А., Солодов С.В. Об эффективности ограничения перенапряжения при дуговых замыканиях на землю различных режимов заземления нейтрали электрических сетей 6–35 кВ. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета.* 2006;(2):71–75.

4. Ощепков В.А., Владимиров Л.В., Плотников Д.И., Шакенов Е.Е., Мельников С.А., Паламарчук Д.В. Влияние режима работы нейтрали распределительных электрических сетей на уровень перенапряжений при однофазном замыкании на землю. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2018;(1–1(67)):119–123. https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.67.090

5. Попугаев А.В. Исследование особенностей явления феррорезонанса в электрических сетях 6–35 кВ на основе математического моделирования. *Бюллетень результатов научных исследований.* 2021;(2):59–68. https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-2-59-68

6. Калентионок Е.В., Мазурек Ю.А. Определение вида однофазного напряжения в воздушных распределительных электрических схемах с изолированной нейтралью. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ — Энергетика : международный научно-технический журнал*. 2012;(6):28–34.

7. Бабичев А.С. Обеспечение условий допустимости вынесенного потенциала в распределительных электрических сетях с низкоомным заземлением нейтрали при замыканиях на землю. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2017;(1):54–60. https://doi.org/10.17213/0321-2653-2017-1-54-60

8. Осипов П.В., Фастий Г.П., Карпов А.С., Ярошевич В.В. Анализ режимов работы нейтрали сети 35 кВ с целью повышения электробезопасности для населения. *Труды Кольского научного центра РАН.* 2016;5–13(39):118–131. URL: https://www.ksc.ru/docs/trudy/energetika/archive/energetiki_13_2016(39).pdf (дата обращения: 18.12.2024).

9. Лавринович М.В. Условия погасания электрической дуги в воздухе. *Известия Томского политехнического университета.* 2009;315(4):51–55.

10. Рыжкова Е.Н. Управление комбинированным заземлением нейтрали. *Известия вузов. Проблемы энергетики.* 2008;(7–8):78–83.

11. Андреев А.А. Анализ существующих разновидностей защит от однофазных замыканий на землю и условия их применения. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки».* 2021;29(4):56–70. https://doi.org/10.14498/tech.2021.4.5

12. Жуковский Ю.Л., Пеленев Д.Н. Адаптивное управление режимом нейтрали распределительных сетей 6-35 кВ предприятий минерально-сырьевого комплекса. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2016;(5–3(47)):103–106. https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.47.045

13. Бурчевский В.А., Владимиров Л.В., Ощепков В.А., Суриков В.И. Обзор режимов заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ. *Омский научный вестник.* 2009;1(77):122–126.

14. Кузьмин А.А., Базаррагча А. К вопросу выбора режима заземления нейтрали в сети среднего класса напряжения городского электроснабжения. *Вестник Чувашского университета.* 2015;(3):62–67. URL: https://www.chuvsu.ru/wp-content/uploads/2020/04/2015_3.pdf (дата обращения: 18.12.2024).

15. Казакул А.А., Касьянов А.В.Сравнительный анализ режимов работы нейтрали в сети 10 КВ на примере распределительных сетей г. Тында. 2020;3(11):86–94.

16. Ашихмин Д.С. Повышение эффективности и надежности работы распределительных сетей при переходе к резистивному заземлению нейтрали. *StudNet.* 2021;4(4):1–8.

17. Михеев Г.М., Зиганшин А.Г. Возможность влияния современных технологий на режим нейтрали электрических сетей. *Вестник Чувашского университета.* 2021;(3):103–112. https://doi.org/10.47026/1810-1909-2021-3-103-112

18. Бакиров А.Р., Васильева А.Ю., Ширковец А.И., Телегин А.В. Опыт применения резистивного заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ горнорудной промышленности. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2011;(S4):328–334.

19. Шишкалов В.А. Сравнение режимов работы изолированных нейтралей и нейтралей с компенсацией в распределительных сетях 6–35 кВ. В: *Труды внутривузовской научно-практической конференции «Новые идеи», Ростов-на-Дону, 09–14 октября 2023 года.* Ростов-на-Дону: ИП Беспамятнов Сергей Владимирович; 2023. С. 129–131.

Об авторах:

Вадим Александрович Шишкалов, магистрант кафедры цифровых технологий и платформ в электроэнергетике Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Страны советов, 1), vadim_shishkalov@mail.ru

Владимир Эдуардович Левчук, ведущий инженер службы релейной защиты и автоматики и автоматизированных систем управления технологическими процессами Ростовского предприятия магистральных электрических сетей (344093, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Днепропетровская, 54/1) и аспирант кафедры цифровые технологии и платформы в электроэнергетике Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), vladimir.levchuk.94@mail.ru

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vadim A. Shishkalov, Master's Degree Student of the Digital Technologies and Platforms in the Electric Power Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), vadim_shishkalov@mail.ru

Vladimir E. Levchuk, Leading Engineer at the Unit of Relay Protection, Automation, and Technological Process Automated Control Systems, Rostov Enterprise of Main Electric Networks (54/1, Dnepropetrovskaya Str., Rostov-on-Don, 344093, Russian Federation), Postgraduate Student of the Digital Technologies and Platforms in the Electric Power Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), vladimir.levchuk.94@mail.ru

Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.