ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(12):171-184
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.317 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_171

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Н.О. Атауллаев[1], А.И. Каршибаев[1], Н.Б. Атауллаева[2]

[1] Навоийский государственный горный и технологический университет, Навои, Узбекистан, e-mail: nodir-82@list.ru
[2] Карманинский политехникум № 2, Навои, Узбекистан,

Аннотация: В энергосистемах горнодобывающих предприятий с сетями 6–10 кВ с изолированной нейтралью особенно актуальна задача селективного и высокочувствительного обнаружения однофазных замыканий на землю. Традиционные релейные защиты и системы контроля не обеспечивают требуемой чувствительности при малых токах утечки, плохо адаптируются к изменениям схемы сети и режимов нагрузки, что приводит к неселективным отключениям, необоснованным остановкам технологического оборудования и росту энергетических потерь. Предложен метод определения тока нулевой последовательности на основе усовершенствованного магнитомодуляцион-ного датчика, обладающего чувствительностью до 1–2 мА и применяемого вместо классических трансформаторов тока. Датчики устанавливаются по продольной дифференциальной схеме на входе и выходе контролируемого участка, что позволяет рассчитывать дифференциальный ток и надёжно фиксировать возникновение однофазного замыкания на землю. Обмен измерительной информацией между датчиками предлагается организовать по каналам Wi-Fi либо по специализированным сигнальным линиям, а для исключения ложных срабатываний вводится дополнительный логический блок подтверждения аварийного режима. Реализация предложенной методики в составе интеллектуальных систем контроля и управления энергосистемами горнодобывающих предприятий позволяет повысить селективность отключения повреждённых участков, сократить простой технологического оборудования и увеличить общую энергетическую и ресурсную эффективность технологического процесса горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: ток нулевой последовательности, магнитомодуляционный датчик, однофазное замыкание на землю, горнодобывающие предприятия, сеть с изолированной нейтралью, высокая чувствительность, Wi-Fi связь.

Благодарность: Статья представлена в рамках Постановления Президента Республики Узбекистан от 2 декабря 2022 года № ПП-436 «О мерах по повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан к “зеленой” экономике до 2030 года».

Для цитирования: *Атауллаев Н. О., Каршибаев А. И., Атауллаева Н. Б.* Методика определения тока нулевой последовательности при однофазных замыканиях на землю в энергосистемах горнодобывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 12. – С. 171–184. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_171.

© Н.О. Атауллаев, А.И. Каршибаев, Н.Б. Атауллаева. 2026.

Methodology for determining null consequency current in one-phase locations on the ground in the energy systems of mining enterprises

N.O. Ataullayev[1], A.I. Karshibayev[1], N.B. Ataullayeva[2]

[1] Navoi State University of Mining and Technology, Navoi, Uzbekistan, e-mail: nodir-82@list.ru
[2] Karmana Polytechnic School No. 2, Navoi, Uzbekistan

Abstract: In the power systems of mining enterprises with 6–10 kV networks with isolated neutrals, the task of selective and highly sensitive detection of single-phase ground closures is particularly relevant. Traditional relay protections and control systems do not provide the required sensitivity at low leakage currents, are poorly adapted to changes in network schemes and load modes, leading to non-selective disconnections, unjustified shutdowns of technological equipment, and increased energy losses. The work proposes a method for determining zero-sequence current based on an improved magnetic modulation sensor with a sensitivity of up to 1-2 mA, which is used instead of classical current transformers. The sensors are installed according to a longitudinal differential scheme at the entrance and exit of the controlled section, allowing for the calculation of differential current and the reliable recording of single-phase ground fault occurrences. It is proposed to organize measurement information exchange between sensors via Wi-Fi channels or specialized signal lines, and to prevent false activations, an additional logical block for confirming emergency mode is introduced. The implementation of the proposed methodology as part of intelligent control and management systems for the energy systems of mining enterprises allows for increased selectivity in disconnecting damaged sections, reducing technological equipment downtime, and increasing the overall energy and resource efficiency of the technological process of mining enterprises.

Key words: zero-sequence current, magnetic modulation sensor, single-phase grounding, mining enterprises, neutral isolated network, high sensitivity, Wi-Fi connection.

Acknowledgements: This article is presented within the framework of the Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan No. PP-436 dated December 2, 2022 «On measures to improve the effectiveness of reforms aimed at transitioning the Republic of Uzbekistan to a "green" economy until 2030.»

For citation: Ataullayev N. O., Karshibayev A. I., Ataullayeva N. B. Methodology for determining null consequency current in one-phase locations on the ground in the energy systems of mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(12):171-184. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_171.

Введение

В настоящее время существует несколько способов предотвращения аварийных ситуаций электрооборудования в энергосистемах горнодобывающих предприятий. Исходя из особенностей электрических сетей возникают сложности при выборе типов систем контроля энергетических систем [1]. Эти сложности, особенно связанные с динамическими изменениями сетевой архитектуры и интеграцией возобновляемых источников энергии, снижают надежность системы и увеличивают расход ресурсов [2].

Системы контроля и управления, предотвращающие однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) должны быть направлены на селективное отключение поврежденных электрических сетей и обеспечение устойчивости энергетических

комплексов [3]. Это повышает надежность электрооборудования энергосистем и обеспечивает ресурсосбережение за счет снижения потерь энергии [4].

Проведенный анализ действующих систем защиты от ОЗЗ не всегда могут селективно определять место замыканий и требуют участия человеческого фактора. Во многих случаях неселективный пуск таких систем происходит из-за изменений в режиме работы и архитектуре электрических сетей технологических процессов [5, 6]. В результате необоснованных остановок технологических процессов снижаются надежность и ресурсоэффективность [4]. Поэтому целесообразно разработать интеллектуальную систему контроля и управления, способную адаптироваться к изменениям в архитектуре энергетических систем горнодобывающих предприятий, включая интеграцию возобновляемых источников энергии [7].

При обеспечении стабильности и энергоэффективности электрических сетей и электрооборудования необходимо учитывать фактор высокочувствительного определения токов нулевой последовательности (ТНП) электрической сети к переменным нагрузкам [8].

Методика измерения тока нулевой последовательности

Для предотвращения ошибочной работы интеллектуальной системы предлагается использовать магнитомодуляционный датчик в качестве модуля первичной информации с высокой чувствительностью (до 1 — 2 мА) вместо традиционных трансформаторов тока [1]. В то же время для того, чтобы система, сформированная таким способом, работала без ошибок, требуется введение дополнительного логического блока для подтверждения аварийного состояния [9, 10].

Для повышения чувствительности и селективности интеллектуальной системы необходимо установить магнитомодуляционные датчики продольным дифференциальным методом. Связь между усовершенствованными магнитомодуляционными датчиками устанавливается с помощью устройства Wi-Fi или специальных сигнальных сетей [11]. При возникновении ОЗЗ в сетях с изолированными нейтралями через магнитомодуляционные датчики предлагаемой системы формируется ТНП I_0 следующим образом [12]:

$$I_0 = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}, \qquad (1)$$

где $I_A + I_B + I_C$ — фазовые токи. Следует отметить, что в электрических сетях напряжением 6 — 10 кВ ТНП равны емкостным токам сети $I_0 \approx I_C$.

При возникновении ОЗЗ в электрических сетях магнитомодуляционные датчики системы контроля и управления определяют токи на входе и выходе сети (рис. 1) по следующему выражению:

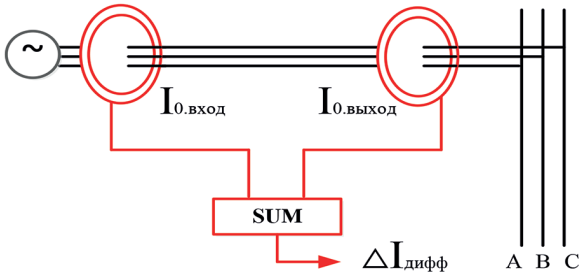


Рис. 1. Схема применения магнитомодуляционного датчика
Fig. 1. Magnetomodulation sensor application scheme

$$\Delta I_{\text{дифф}} = |I_{0.\text{вход}} - I_{0.\text{выход}}|, \qquad (2)$$

где $I_{0.\text{вход}}$, $I_{0.\text{выход}}$ — ТНП на входе и выходе сети. Схема применения магнитомодуляционного датчика представлена на рис. 1.

Здесь выходной сигнал от магнитомодуляционного датчика пропорционален ТНП [9, 13]:

$$u_{\text{вых}} = k \cdot B = k \cdot \mu_0 \cdot \frac{I}{2\pi r}, \qquad (3)$$

где $u_{\text{вых}}$ — выходное напряжение преобразователя; k — коэффициент чувствительности; B — магнитная индукция; μ_0 — магнитная постоянная; I — ток; r — расстояние от сети до преобразователя.

В данном методе в схему применения магнитомодуляционного датчика устанавливается фильтр, который преобразует ТНП в сигнал с целью нормализации высокочастотных гармоник и формирования правильных данных [1]. Схема применения магнитомодуляционного датчика через фильтр представлена на рис. 2.

Связь между магнитомодуляционными датчиками интеллектуальной системы обеспечивает передачу данных с помощью устройства Wi-Fi. Передача данных моделируется следующим образом:

$$t_{\text{мал.перед}} = t_{\text{обр}} + t_{\text{пер.сиг}} + t_{\text{син.сиг}}, \qquad (4)$$

где $t_{\text{обр}}$ — время обработки сигнала в блоке; $t_{\text{пер.сиг}}$ — время передачи сигнала по Wi-Fi; $t_{\text{син.сиг}}$ — время синхронизации сигнала; время, необходимое для системы $t_{\text{мал.перед}}$ должно быть <10 мс.

При возникновении ОЗЗ в электрических сетях с изолированными нейтралями составляющая емкостных токов определяется выражением $I_c = 3\omega \cdot C_\Sigma \cdot U_\phi$ [14]. Формула ТНП, в свою очередь, записывается методом продольного дифференциала в следующем виде:

$$\Delta I_{\text{дифф}} = 3\omega \cdot C_\Sigma \cdot U_\phi. \qquad (5)$$

При наличии внешнего тока I_0, проходящего через тороид, возникает дополнительное постоянное смещение магнитной индукции, которое нарушает симметрию намагничивания и создает вторую гармонику во вторичной обмотке. В целях предотвращения высокочастотных шумов в энергосистеме и потерь в процессе передачи сигнала выходной сигнал с пропорциональными ТНП [15], определенный магнитомодуляционным датчиком, был переведен в вид $u_{\text{выход}}$ и определялся следующим образом:

$$u_{\text{выход}} = k \cdot I_0 \cdot \sin(2\omega t), \qquad (6)$$

где k — коэффициент чувствительности; ω — частота возбуждения.

При реализации магнитомодуляционного датчика предлагаемой системы

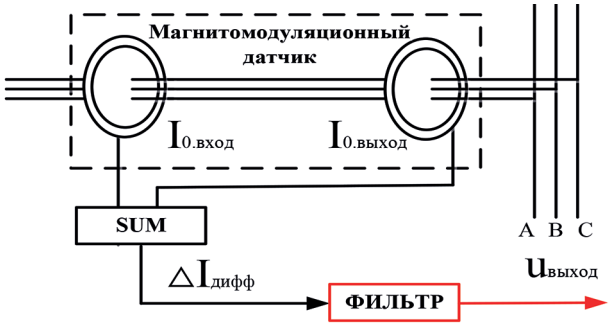


Рис. 2. Схема применения магнитомодуляционного датчика через фильтр
Fig. 2. Magnetomodulation sensor application scheme through filter

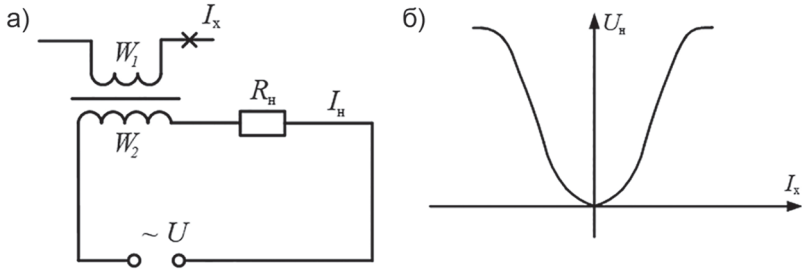


Рис. 3. Схема простой магнитной системы (а) и ее статическая характеристика (б)
Fig. 3. Diagram of a simple magnetic system (a) and its static characteristic (b)

важное значение имеет правильный выбор ферромагнитного материала сердечника. Для магнитомодуляционного датчика с высокой чувствительностью оптимальным является аморфный сплав типа Fe-based с $\mu \approx 150\,000$ и $B_S = 1{,}4$ Тл.

Необходимо создать магнитное поле, периодически насыщающее аморфный сплавной сердечник типа Fe-based (от $-B_S$ до $+B_S$). Если сердечник периодически насыщается с обеих сторон, то при появлении внешнего тока нарушается симметрия насыщения и в измерительной обмотке появляется вторая гармоника сигнала. То есть переход от $-B_S$ к $+B_S$ является основой для регистрации слабых внешних токов для модуляции μ проводимости [16]. В энергетических системах во время ОЗЗ кривая смещается в зависимости от величины ТНП, что позволяет точно измерять малые токи.

Анализ результатов исследования

Магнитомодуляционным датчиком системы контроля и управления являются усилители, принцип работы которых основан на использовании нелинейных характеристик ферромагнитных материалов. Схема простого магнитомодуляционного датчика показана на рис. 3, *а*, а его статическая характеристика — на рис. 3, *б*. Из статической характеристики видно, что обычный магнитомодуляционный датчик не чувствует направления измеряемого тока.

В системе контроля и управления, усовершенствованной на основе усиленного магнитомодуляционного датчика, имеется возможность повышения чувствительности для измерения малых токов и получения направленной статической характеристики. Таким образом, для изготовления магнитомодуляционного датчика требуются многовитковые (до 5) ферромагнитные сердечники, что создает определенные трудности при изготовлении и настройке магнитомодуляционных датчиков системы.

Конструктивная (рис. 4, *а*) и электрическая схема (рис. 4, *б*) соединения секций обмотки магнитомодуляционного датчика приведены на рис. 4. Магнитомодуляционный датчик состоит из сердечника, выполненного в виде трех коаксиально расположенных замкнутых кольцевых магнитопроводов *1*, *2* и *3*, каждая из соседних пар соединена между собой диаметральным ферромагнитом *4*, в котором размещены секции обмотки *5* переменного тока. Секции обмоток коллектора *6* и базы *7* распределены по среднему кольцевому магнитопроводу *2* и равномерно намотаны. Секции обмоток *5* с соответствующей индуктивностью соединены между собой последовательно в каждом кольцевом зазоре, а секции обмоток *5*, расположенных в соседних кольцевых зазорах, индуктивно соединены противоположно. Толщины кольцевых магнитопроводов *1*, *2* и *3* выбраны из условия равенства их маг-

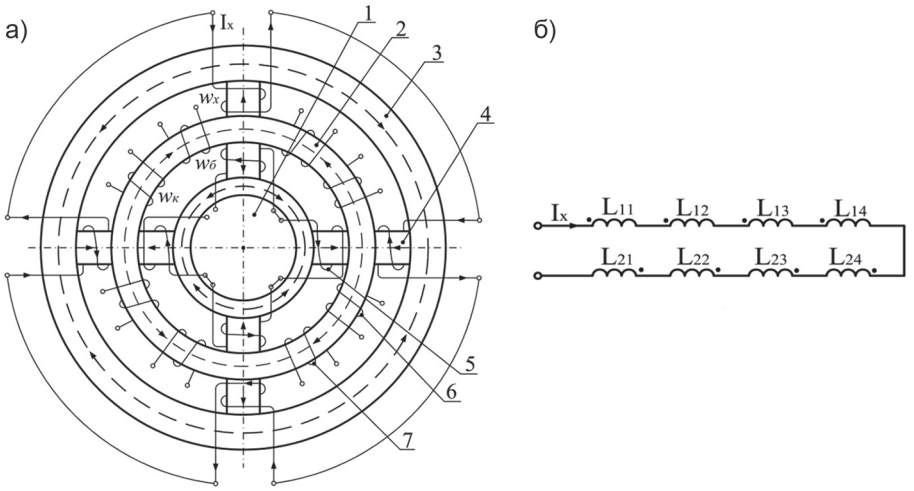


Рис. 4. Конструктивная (а) и электрическая (б) схемы соединения секций обмотки магнитомодуляционного датчика

Fig. 4. Structural (a) and electrical (b) connection schemes for the winding sections of the magnetomodulation

нитных сопротивлений на пути соответствующих рабочих магнитных потоков, а именно:

$$Z_{\mu 1} = \frac{l_{1cp}}{\mu\mu_0 bh_1} = Z_{\mu 2} = \\ = \frac{l_{2cp}}{\mu\mu_0 bh_2} = Z_{\mu 3} = \frac{l_{3cp}}{\mu\mu_0 bh_3} \quad (7)$$

где l_{1cp}, l_{2cp}, l_{3cp}, h_1, h_2, h_3, b — средняя длина, толщина и ширина окружности замкнутых кольцевых магнитопроводов *1*, *2* и *3* соответственно; μ, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — относительная магнитная проницаемость и магнитная постоянная сердечника.

Магнитомодуляционный датчик является нелинейным элементом системы, так как содержит ферромагнитный сердечник с гистерезисным кольцом намагничивания, обладающий нелинейными свойствами [17].

Найдем следующее выражение из (7):

$$h_2 = h_1 \frac{l_{2cp}}{l_{1cp}}, h_3 = h_2 \frac{l_{3cp}}{l_{2cp}} = h_1 \frac{l_{3cp}}{l_{1cp}}. \quad (8)$$

При анализе функции преобразования магнитомодуляционного датчика в статическом режиме значение линии пропускания непрерывной части системы принимается равным нулю, что не влияет на значение выходного сигнала в бесконечное время *t*. Поэтому дискретность работы магнитомодуляционного датчика не учитывается при анализе его преобразовательных функций.

Таким образом, магнитомодуляционный датчик можно рассматривать как непрерывное звено системы контроля и управления с нелинейной функцией преобразования при анализе статических характеристик. Удовлетворительная точность аппроксимации средней кривой намагниченности сердечников магнитомодуляционного датчика, изготовленного из электротехнической стали и ферритов с непрямоугольной петлей гистерезиса, обеспечивает функции гиперболического арксинуса (*arcsin*) и тригонометрического арктангенса (*arctg*):

$$B = k_1 \, arcsin\left(k_2 H\right), \quad (9)$$

$$B = k_2 arctg\left(k_2 H\right), \quad (10)$$

где k_1, k_2 — коэффициенты аппроксимации.

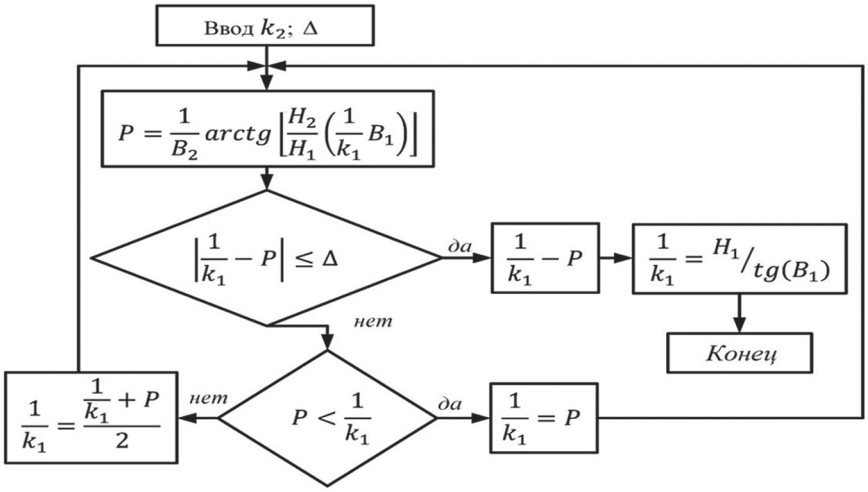


Рис. 5. Алгоритм нахождения коэффициентов аппроксимации средней кривой намагниченности стали
Fig. 5. Algorithm for finding the approximation coefficients of the average magnetization curve of steel

При дифференцировании и интегрировании аппроксимирующей функции используем выражение (10) для получения аналитических выражений, удобных для исследования характеристик магнитомодуляционного датчика.

Подставив в выражение (10) значения индукции магнитного поля B и напряженности H для двух наиболее характерных точек экспериментальной кривой намагничивания, получим две системы уравнений с соответствующими коэффициентами аппроксимации k_1 и k_2. Характерными точками средней кривой намагничивания стали при указанных значениях напряжения H_1 и H_2 являются точки $B_1 = B_r$ и $B_2 = B_m$, соответствующие остаточной индукции и максимальному значению индукции B_m. Подставляя значения B и H, получим следующую систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} H_1 &= \frac{1}{k_2} tg\left(\frac{1}{k_1}B_1\right) \\ H_2 &= \frac{1}{k_2} tg\left(\frac{1}{k_1}B_1\right) \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

Алгоритм нахождения коэффициентов аппроксимации путем решения разработанной системы уравнений (11) методом последовательного приближения к коэффициентам k_1 и k_2 с заданной точностью Δ представлен на рис. 5.

Средняя кривая намагниченности, рассчитанная по формуле

$$B = k_1 arctg\left(k_2 H\right)$$

для аморфного тороидального стержня (Fe-based) $\mu \approx 150\,000$, $B_S = 1{,}4$, Тл, представлена на рис. 6.

Разработан алгоритм для определения ТНП в электрических сетях по выражению $\Delta I_{дифф} = |I_{0.вход} - I_{0.выход}|$ и обеспечения интеграции с логическим блоком. Алгоритм обеспечения интеграции значений ТНП в энергосистемах с логическим блоком системы контроля и управления представлен на рис. 7.

Возникает необходимость использования фильтра устранения высокочастотных помех в магнитомодуляционном датчике, используемом для определения ТНП системы контроля и управления.

При устранении высокочастотных шумов для умножения сигнала на опорную частоту f_m используется синхронный детектор, который интегрирует результат по периоду и определяет нап-

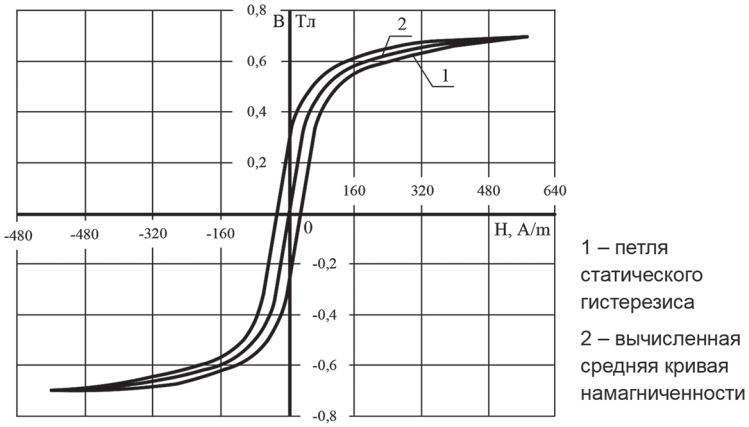


Рис. 6. Кривая средней намагниченности
Fig. 6. Mean magnetization curve

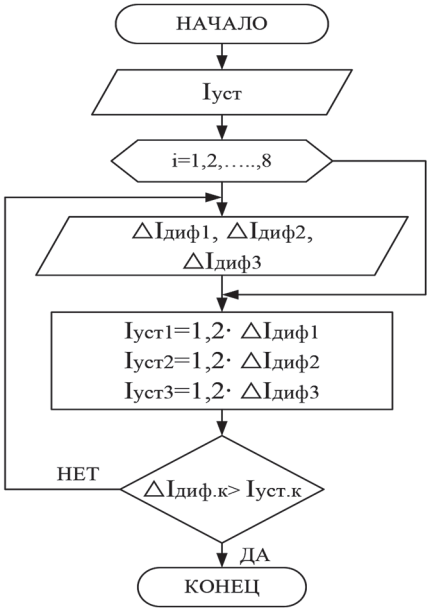


Рис. 7. Алгоритм обеспечения интеграции системы контроля и управления значениями токов нулевой последовательности в энергосистемах с логическим блоком
Fig. 7. Algorithm for ensuring the integration of the control and management system for zero-sequence current values in power systems with a logic unit

ряжение, пропорциональное $\Delta I_{\text{дифф}}$, по следующей формуле:

$$U_{\text{дет}} = \frac{1}{T}\int_0^T u_2 \cdot sin\left(2\pi f_m t\right)dt ,$$

где T — период, приспособленный для реального времени в электрических сетях (скорость < 10 мс).

Для удаления остатков f_m после демодуляции сигнал проходит через низкочастотный фильтр 2-го порядка через функцию

$$H(s) = \frac{1}{\left(1 + s/\omega_c\right)^2}$$

(где ω_c — частота резания). В целях устранения влияния погрешностей преобразованных токов разработана логическая последовательность обработки сигнала. Блок последовательной логики для фильтра устранения высокочастотных помех в магнитомодуляционном датчике представлен на рис. 8.

Параметры фильтра устранения высокочастотных шумов выбраны на ос-

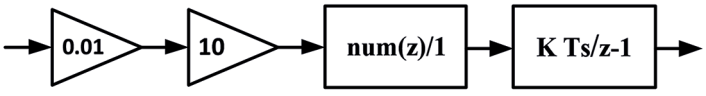


Рис. 8. Блок последовательной логики для фильтра устранения высокочастотных шумов
Fig. 8. Sequential logic unit for high-frequency noise elimination filter

нове предварительного анализа спектрального состава полезного сигнала и помех, с учетом требуемой полосы пропускания, глубины подавления высокочастотных составляющих и минимизации искажений информативного сигнала. Окончательный выбор параметров подтвержден результатами имитационного моделирования. Алгоритм логического блока фильтра устранения высокочастотных помех представлен на рис. 9.

Традиционные системы защиты от ОЗЗ недостаточно чувствительны для надежного обнаружения низкозначных ТНП в сетях с изолированной нейтралью [18]. С целью повышения чувствительности определения ТНП внедрение интеллектуальных систем на основе магнитомодуляционных датчиков является инновационным подходом к решению данной проблемы. Разработана имитационная модель системы контроля и управления, сформированная на основе магнитомодуляционных датчиков, в среде MATLAB Simulink. [19]. В отличие от существующих подходов, магнитомодуляционный датчик, сформированный методом продольной дифференциальной

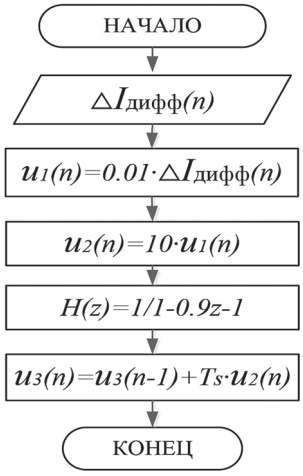


Рис. 9. Алгоритм фильтра устранения высокочастотных шумов

Fig. 9. High-frequency noise elimination filter algorithm

защиты, адаптируется к динамическим условиям энергосистем и колебаниям в сопротивлении изоляции [20, 21]. На участке электрической сети, где возникло ОЗЗ, ток из одной фазы течет на землю, и возникает дисбаланс, который выражается следующим образом [22]:

$$\Delta I_{дифф} = I_{0.вход} - I_{0.выход}.$$

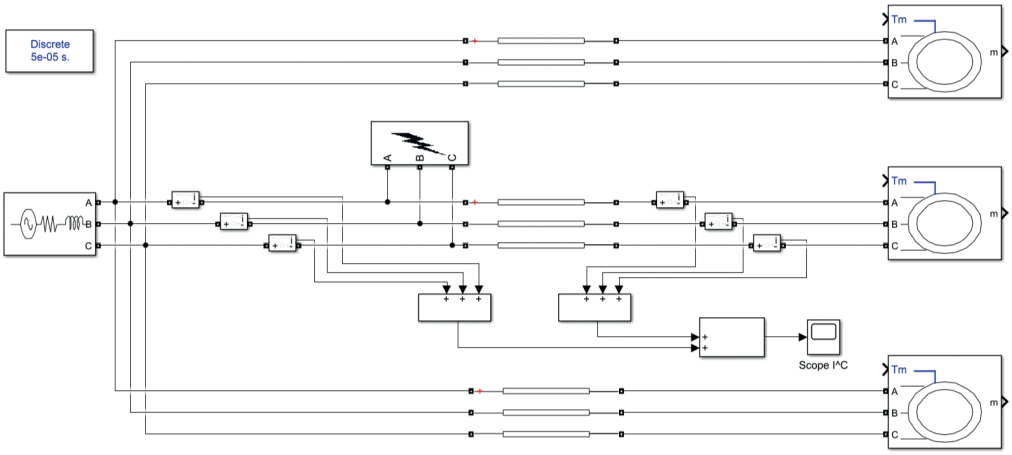


Рис. 10. Имитационная модель, позволяющая определять токи нулевой последовательности в энергосистемах горнодобывающих предприятий

Fig. 10. Simulation model allowing for the determination of zero-sequence currents in power systems of mining enterprises

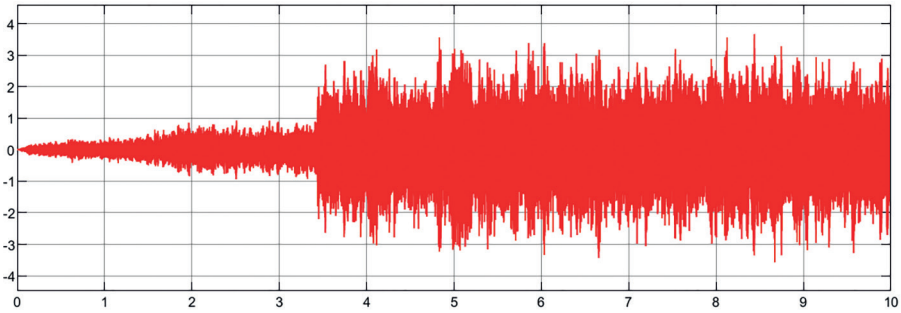


Рис. 11. Состояние отсутствия ОЗЗ в электрических сетях с изолированными нейтралями
Fig. 11. The absence of single-phase grounding in electrical networks with isolated neutrals

В нормальном состоянии ТНП равно нулю, однако при возникновении ОЗЗ наблюдается резкое увеличение значения. Имитационная модель [23], позволяющая определить ТНП в энергосистемах горнодобывающих предприятий, представлена на рис. 10.

Метод продольного дифференциала основан на принципе, что сумма ТНП на входе и выходе сети в нормальном состоянии равна нулю. При возникновении ОЗЗ возникает дисбаланс, то есть продольная дифференциальная разность ТНП больше тока установки, что реализуется с помощью следующего выражения:

$$\Delta I_{\text{дифф}} > I_{\text{уст}}$$

Если значение ТНП превышает предельное значение, определенное по условиям комплекса (уставка $I_{\text{уст}} = 1{,}2 \cdot \Delta I_{\text{дифф}}$), это означает, что произошло ОЗЗ, и полученные результаты визуализируются в блоке Scope.

Анализ состояний наличия и отсутствия ОЗЗ в электрических сетях с изолированными нейтралями с целью проверки результатов имитационной модели, позволяющей определить ТНП предлагаемой интеллектуальной системы, представлен на рис. 11 и 12.

При имитационном моделировании приняты следующие допущения: параметры элементов электрической сети считались неизменными на интервале расчета; влияние случайных факторов, не оказывающих существенного влияния на информативный сигнал, не учитывалось; уровень помех задавался в пределах, соответствующих реальным условиям эксплуатации. Ограничения модели связаны с применением к сетям 6 — 10 кВ с изолированной нейтралью и с диапазоном параметров, в котором обеспечивается корректная работа предложенного метода.

Результаты показывают, что магнитомодуляционный датчик системы конт-

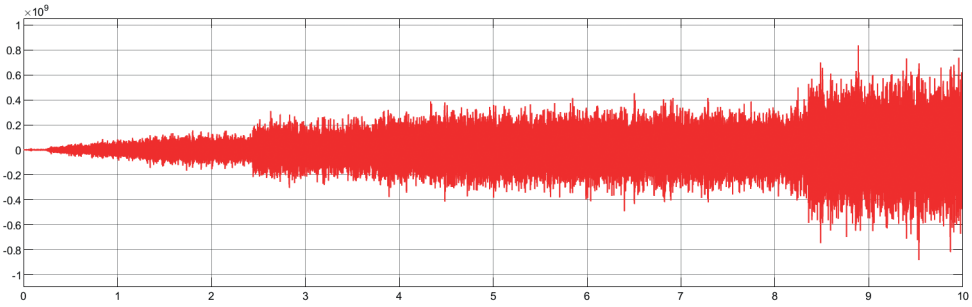


Рис. 12. Состояние, при котором в электрических сетях с изолированными нейтралями имеется ОЗЗ
Fig. 12. The state in which electrical networks with isolated neutrals have a single-phase ground fault

роля и управления, реализованный продольным дифференциальным методом, обладает высокой чувствительностью даже при малых значениях ТНП $\Delta I_{\text{дифф}}$ в случаях ОЗЗ. Анализ состояний наличия и отсутствия ОЗЗ в электрических сетях с изолированными нейтралями показывает, что магнитомодуляционный датчик предлагаемой системы обладает высокой чувствительностью и имеет преимущество перед существующими системами при селективном определении токов ОЗЗ. Чувствительность интеллектуальной системы, устойчивость к шуму и фоновому дрейфу крайне важны для энергетических систем, интегрированных с альтернативными источниками энергии и имеющих изменчивую архитектуру.

Выводы

Предложенный метод позволяет более надежно определять ТНП и фиксировать ОЗЗ в сетях 6—10 кВ с изолированной нейтралью при малых токах утечки. По сравнению с традиционными подходами предложенный метод обеспечивает более высокую чувствительность измерения, повышение селективности отключения поврежденного участка и снижение вероятности ложных срабатываний за счет применения высокочувствительного магнитомодуляционного датчика и логического блока подтверждения аварийного режима. Ключевыми критериями являются определение величины ТНП продольным дифференциальным методом с использованием магнитомодуляционных датчиков, устойчивость сигнала после фильтрации и задание тока уставки на основе значения ТНП. За счет селективного отключения поврежденного участка и снижения вероятности ложных срабатываний обеспечиваются бесперебойность электроснабжения и стабильность технологических процессов, поскольку предотвращается развитие аварий и избыточные отключения при ложном обнаружении ОЗЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атауллаев Н. О., Дерюгина Е. А., Муродов Х. Ш.* Статические характеристики преобразователей постоянного тока с магнитной модуляцией с аналоговым фильтром // Наука и техника. — 2023. — № 5. — С. 428—432. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-5-428-432.

2. *Bala Prasad M., Ganesh P., Vinay Kumar K., Mohanarao P. A., Aakula Swathi, Vasupalli Manoj* Renewable energy integration in modern power systems: challenges and opportunities // E3S Web of Conferences. 2024, vol. 591, article 03002. DOI: 10.1051/e3sconf/202459103002.

3. *Merey Jetpissov, Kazhybek Tergemes, Saken Sheryazov, Algazy Zhauyt, Toleuserik Sadykbek, Abdissattar Berdibekov, Gulbarshyn Smailova* A selective method for identifying single-phase ground faults with transient resistance in isolated neutral medium-voltage networks // Energies. 2025, vol. 18, no. 21, article 5699. DOI: 10.3390/en18215699.

4. *Мухторов А. Ф., Гафуров М. О., Аннаев З. Й.* Надежность электротехнических систем предприятий с непрерывными технологическими процессами // Universum: технические науки. — 2020. — № 11(80). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10863.

5. *Andréia da Silva Santos, Lucas Teles Faria, Mara Lúcia M. Lopes, Anna Diva P. Lotufo, Carlos R. Minussi* Efficient methodology for detection and classification of short-circuit faults in distribution systems with distributed generation // Sensors. 2022, vol. 22, no. 23, article 9418. DOI: 10.3390/s22239418.

6. *Yilong Kang, Huanruo Qi, Rui Liu, Xiangyang Yan, Chen Chen, Fei Guo, Fang Guo, Xiaoxiao Dong* Short-circuit current calculation of single-phase to ground fault in petal-shaped distribution network // Processes. 2025, vol. 13, no. 8, article 2393. DOI: 10.3390/pr13082393.

7. *Мосин Д. А., Цветков А. Ю., Прохоров М. А.* Методологический подход к совершенствованию автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими системами специального назначения на основе внедрения технологий искусственного интеллекта // Теоретические основы, расчеты и проектирование. — 2021. — С. 3—14. DOI: 10.53816/23061456_2021_11—12_3.

8. *Назарычев А. Н.*, *Устинов Д. А.*, *Пеленев Д. Н.*, *Бабырь К. В.* Исследование защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на измерении тока обратной последовательности // Электричество. — 2024. — № 2. — С. 31—41. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-2-31-41.

9. *Романюк Ф. А.*, *Румянцев Ю. В.*, *Румянцев В. Ю.*, *Новаш И. В.* Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2021. — Т. 64. — № 2. — С. 95—108. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108.

10. *Романюк Ф. А.*, *Румянцев В. Ю.*, *Румянцев Ю. В.* Цифровые фильтры симметричных составляющих входных сигналов микропроцессорных защит электроустановок // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2023. — Т. 66. — № 1. — С. 5—17. DOI: 10.21122/1029-7448-2023-66-1-5-17.

11. *Носенко В. А.*, *Силаев А. А.*, *Ефремкин С. И.* Обзор беспроводных технологий, применяемых для автоматизации технологических процессов // Инженерный вестник Дона. — 2019. — № 1(52). https://www.ivdon.ru/-back_media/uploads/article/pdf/IVD_200_Nosenko.pdf_bc9f4b2f02.pdf.

12. *Jiawei Yuan, Tong Wu, Yanjie Hu, Zaibin Jiao* Faulty feeder detection based on image recognition of voltage-current waveforms in noneffectively grounded distribution networks // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022, vol. 143, article 108434. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108434.

13. *Xianmin Mu, Qiyu Sheng, Jialin Li, Siqi Yu, Jiahao Zhang* Fault detection system of single-phase grounding based on electric field sensor // IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (IEACon). Malaysia. 2022, pp. 61—66. DOI: 10.1109/IEACon55029.2022.9951738.

14. *Ataullayev N., Tatkeyeva G., Kurabayev I., Murodov X.* Experimental research of the developed method to determine the network insulation for ungrounded AC systems in laboratory conditions // International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies. Prague, Czech Republic. 2022, pp. 1—4. DOI: 10.1109/ICECET55527.2022.9873012.

15. *Алёшин К. С.*, *Кузьмина Н. В.*, *Семушкин А. А.*, *Шадрикова Т. Ю.*, *Шуин В. А.* Многочастотная направленная защита от замыканий на землю в некомпенсированных сетях 6—10 кВ // Вестник ИГЭУ. — 2025. — № 5. — С. 39—49. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.039-049.

16. *Hang Wang, Tianhu Weng, Wenfang Ding, Shuai Yang, Zheng Xiao, Hang Li, Jun Chen* Phase selection method for 10 kv three-core cables under single-phase grounding fault transient based on surface magnetic field sensing // Sensors. 2026, vol. 26, no. 3, article 1016. DOI: 10.3390/s26031016.

17. *Амиров С. Ф.*, *Мухсимов Ш. С.*, *Юлдашев Н. Р.* Разработка математической модели трансформатора тока с автоматическим регулированием диапазона с использованием метода параметрической структурной схемы // Железнодорожный транспорт: актуальные вопросы и инновации. — 2023. — Т. 3. — № 3. — С. 55—61. https://transportjournals.-com/index.php/InnoTrans/article/view/53.

18. *Georgeta B., Antonov A., Constantin B.* Aspects of the earthing and short-circuit device's safety quality // MATEC Web of Conferences. 2022, vol. 373, article 00057. DOI: 10.1051/matecconf/202237300057.

19. *Каршибоев А. И.*, *Атауллаев Н. О.*, *Рахимова Ш.* Разработка имитационной модели магнитной системы ММД микропроцессорной защитной устройства для измерения тнп в энергетических системах // Международный журнал передовых технологий и естествознания. — 2025. — Т. 3(6). — С. 156—161. DOI: 10.24412/2181-144X-2025-3-156-161.

20. *Hongchun Shu, Yaqi Deng, Jun Dong, Pulin Cao, Bo Yang, Zhiqian Bo* A detection method of high impedance arcing fault for distribution network with distributed generation based on CEEMDAN and TEO algorithm // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2021, vol. 31, no. 22, pp. 1—17. DOI: 10.1002/2050-7038.12926.

21. *Mohammadi A., Jannati M., Shams M.* A protection scheme based on conditional generative adversarial network and convolutional classifier for high impedance fault detection in distribution networks // Electric Power Systems Research. 2022, vol. 212, article 108633. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.108633.

22. *Шабанов В. А.*, *Сорокин А. В.* Определение токов однофазного замыкания в сети с изолированной нейтралью / XIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Россия Молодая». — Кемерово, 2021. — С. 021323.1-8. https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/-2021/RM21/pages/Articles/021323.pdf.

23. *Masoom A., Mahseredjian J., Ould-Bachir T., Guironne A.* MSEMT: An advanced modelica library for power system electromagnetic transient studies // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021, vol. 37, no. 4, pp. 2453—2463. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3111127. ГИАБ

REFERENCES

1. Ataullaev N. O., Deryugina E. A., Murodov Kh. Sh. Static characteristics of DC converters with magnetic modulation and an analog filter. *Science and technology*. 2023, no. 5, pp. 428 — 432. [In Russ]. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-22-5-428-432.

2. Bala Prasad M., Ganesh P., Vinay Kumar K., Mohanarao P. A., Aakula Swathi, Vasupalli Manoj Renewable energy integration in modern power systems: challenges and opportunities. *E3S Web of Conferences*. 2024, vol. 591, article 03002. DOI: 10.1051/e3sconf/202459103002.

3. Merey Jetpissov, Kazhybek Tergemes, Saken Sheryazov, Algazy Zhauyt, Toleuserik Sadykbek, Abdissattar Berdibekov, Gulbarshyn Smailova A selective method for identifying single-phase ground faults with transient resistance in isolated neutral medium-voltage networks. *Energies*. 2025, vol. 18, no. 21, article 5699. DOI: 10.3390/en18215699.

4. Mukhtorov A. F., Gafurov M. O., Annayev Z. Y. Reliability of electrical systems of enterprises with continuous technological processes. *Universum: technical sciences*. 2020, no. 11(80). [In Russ]. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10863.

5. Andréia da Silva Santos, Lucas Teles Faria, Mara Lúcia M. Lopes, Anna Diva P. Lotufo, Carlos R. Minussi Efficient methodology for detection and classification of short-circuit faults in distribution systems with distributed generation. *Sensors*. 2022, vol. 22, no. 23, article 9418. DOI: 10.3390/s22239418.

6. Yilong Kang, Huanruo Qi, Rui Liu, Xiangyang Yan, Chen Chen, Fei Guo, Fang Guo, Xiaoxiao Dong Short-circuit current calculation of single-phase to ground fault in petal-shaped distribution network. *Processes*. 2025, vol. 13, no. 8, article 2393. DOI: 10.3390/pr13082393.

7. Mosin D. A., Tsvetkov A. Yu., Prokhorov M. A. Methodological approach to improving automated control systems for complex special-purpose organizational and technical systems based on the implementation of artificial intelligence technologies. *Theoretical Foundations, Calculations, and Design*. 2021, pp. 3 — 14. [In Russ]. DOI: 10.53816/23061456_2021_11 — 12_3.

8. Nazarychev A. N., Ustinov D. A., Pelenyev D. N., Babyr K. V. Investigation of protection against single-phase ground closures based on measuring reverse-sequence current. *Electricity*. 2024, no. 2, pp. 31 — 41. [In Russ]. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-2-31-41.

9. Romanyuk F. A., Rumyantsev Yu. V., Rumyantsev V. Yu., Novash I. V. Improving the algorithm for forming orthogonal components of input quantities in microprocessor protections. *Energy. Proceedings of Higher Educational Institutions and CIS Energy Associations*. 2021, vol. 64, no. 2, pp. 95 — 108. [In Russ]. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108.

10. Romanyuk F. A., Rumyantsev V. Yu., Rumyantsev Yu. V. Digital filters of symmetrical components of input signals of microprocessor protections of electrical installations. *Energy. Proceedings of Higher Educational Institutions and CIS Energy Associations*. 2023, vol. 66, no. 1, pp. 5 — 17. [In Russ]. DOI: 10.21122/1029-7448-2023-66-1-5-17.

11. Nosenko V. A., Silaev A. A., Efremkin S. I. Overview of wireless technologies used for automating technological processes. *Don Engineering Bulletin*. 2019, no. 1(52). [In Russ]. https://www.ivdon.ru/-back_media/uploads/article/pdf/IVD_200_Nosenko.pdf_bc9f4b2f02.pdf.

12. Jiawei Yuan, Tong Wu, Yanjie Hu, Zaibin Jiao Faulty feeder detection based on image recognition of voltage-current waveforms in noneffectively grounded distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022, vol. 143, article 108434. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108434.

13. Xianmin Mu, Qiyu Sheng, Jialin Li, Siqi Yu, Jiahao Zhang Fault detection system of single-phase grounding based on electric field sensor. *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (IEACon). Malaysia*. 2022, pp. 61 — 66. DOI: 10.1109/IEACon55029.2022.9951738.

14. Ataullayev N., Tatkeyeva G., Kurabayev I., Murodov X. Experimental research of the developed method to determine the network insulation for ungrounded AC systems in laboratory conditions. *International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies*. Prague, Czech Republic. 2022, pp. 1 — 4. DOI: 10.1109/ICECET55527.2022.9873012.

15. Aleshin K. S., Kuzmina N. V., Semushkin A. A., Shadrikova T. Y., Shuin V. A. Multi-frequency directional protection against earth faults in uncompensated 6–10 kV networks. *Vestnik IGEU*. 2025, no. 5, pp. 39 — 49. [In Russ]. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.039-049.

16. Hang Wang, Tianhu Weng, Wenfang Ding, Shuai Yang, Zheng Xiao, Hang Li, Jun Chen Phase selection method for 10 kv three-core cables under single-phase grounding fault transient based on surface magnetic field sensing. *Sensors*. 2026, vol. 26, no. 3, article 1016. DOI: 10.3390/s26031016.

17. Amirov S. F., Mukhimov Sh. S., Yuldashev N. R. Development of a mathematical model for a current transformer with automatic range control using the parametric structural scheme method.

Railway Transport: Current Issues and Innovations. 2023, vol. 3, no. 3, pp. 55 — 61. [In Russ]. https://transportjournals.-com/index.php/InnoTrans/article/view/53.

18. Georgeta B., Antonov A., Constantin B. Aspects of the earthing and short-circuit device's safety quality. *MATEC Web of Conferences*. 2022, vol. 373, article 00057. DOI: 10.1051/matecconf/202237300057.

19. Karshiboev A. I., Ataullaev N. O., Rakhimova Sh. Development of an imitation model of the magnetic system MDM of a microprocessor protective device for measuring TNP in power systems. *International journal of advanced technology and natural science*. 2025, vol. 3(6), pp. 156 — 161. [In Russ]. DOI: 10.24412/2181-144X-2025-3-156-161.

20. Hongchun Shu, Yaqi Deng, Jun Dong, Pulin Cao, Bo Yang, Zhiqian Bo A detection method of high impedance arcing fault for distribution network with distributed generation based on CEEMDAN and TEO algorithm. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2021, vol. 31, no. 22, pp. 1 — 17. DOI: 10.1002/2050-7038.12926.

21. Mohammadi A., Jannati M., Shams M. A protection scheme based on conditional generative adversarial network and convolutional classifier for high impedance fault detection in distribution networks. *Electric Power Systems Research*. 2022, vol. 212, article 108633. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.108633.

22. Shabanov V. A., Sorokin A. V. Determination of single-phase closing currents in a network with an isolated neutral. *XIII Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh «Rossiya Molodaya»* [XIII All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists «Young Rossia»], Kemerovo, 2021, pp. 021323.1-8. [In Russ]. https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/-2021/RM21/pages/Articles/021323.pdf.

23. Masoom A., Mahseredjian J., Ould-Bachir T., Guironne A. MSEMT: An advanced modelica library for power system electromagnetic transient studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021, vol. 37, no. 4, pp. 2453 — 2463. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3111127.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Атауллаев Нодиржон Одилович[1] — PhD, доцент,
доцент кафедры «Электроэнергетика», e-mail: nodir-82@list.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1689-813X,
Каршибаев Аскарбек Илашевич[1] — DSc, профессор,
декан Энерго-механического факультета,
e-mail: a_karshibaev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1088-4041,
Атауллаева Насиба Баходировна — преподаватель,
Карманинский политехникум № 2, Навои, Республика Узбекистан,
[1] Навоийский государственный горный и технологический университет,
Навои, Республика Узбекистан, 210100.
Для контактов: Атауллаев Н.О., e-mail: nodir-82@list.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.O. Ataullayev[1], PhD, Associate Professor,
Associate Professor of the «Electric Power Engineering» department,
e-mail: nodir-82@list.ru, ORCID ID: 0000-0002-1689-813X,
A.I. Karshibayev[1], DSc, Professor, Dean of the Faculty of Energy Mechanics,
e-mail: a_karshibaev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-1088-4041,
N.B. Ataullayeva, Teacher, Karmana Polytechnic School No. 2,
Navoi, Republic of Uzbekistan
[1] Navoi State Mining and Technology University,
210100, Navoi, Republic of Uzbekistan.
Corresponding author: N.O. Ataullayev, e-mail: nodir-82@list.ru.

Получена редакцией 20.05.2026; получена после рецензии 23.07.2026; принята к печати 10.11.2026.
Received by the editors 20.05.2026; received after the review 23.07.2026; accepted for printing 10.11.2026.