



МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА РАЗРАБОТАННОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЗАЩИТНОЙ УСТАНОВКИ ОТ ОЗЗ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Каршибаев А.¹[0000-0003-1088-4041], Атауллаев Н.²[0000-0002-1689-813X]

¹DSc., профессор Навоийского государственного горно-технологического университета

²PhD., доцент Навоийского государственного горно-технологического университета

E-mail: nodir-82@list.ru

Аннотация. В статье изложена методология разработки измерительного блока микропроцессорной защитной установки от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), предназначенной для применения в энергетических системах горнопромышленных предприятий. Предложенная методология основана на интеграции микромагнитных датчиков (ММД), трансформаторов напряжения (ТН), цифровой обработки сигналов и адаптивных алгоритмов, обеспечивающих повышение чувствительности, селективности и устойчивости работы системы защиты. Моделирование, выполненное в среде MATLAB Simulink, показало, что использование адаптивной логики и фильтрации сигналов позволяет достичь селективности до 98% при времени срабатывания менее 10 мс. Разработанный подход эффективен для электрических сетей с изолированной нейтралью напряжением 6–35 кВ, обеспечивая надёжное функционирование защиты даже при изменении ёмкостных токов и воздействии внешних электромагнитных помех.

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, микропроцессорная защита, изолированная нейтраль, микромагнитный датчик, цифровая обработка сигналов, адаптивная уставка, MATLAB Simulink.

Annotatsiya. Maqolada kon sanoati energetik tizimlarida yerga bir fazali yerga tutashuvlardan (BFYT) himoyalovchi mikroprotssessorli qurilmaning o'lchov bloki ishlab chiqish metodologiyasi keltirilgan. Taklif etilgan yondashuv mikromagnit datchik (MMD), kuchlanish transformatori (KT), raqamli signalni qayta ishlash va adaptiv algoritmlarni birlashtirish orqali himoya tizimining sezgirliigi, tanlovchanligi va barqarorligini oshiradi. MATLAB Simulink muhiti asosida o'tkazilgan modellastirish natijalari shuni ko'rsatadiki, adaptiv mantiq va signal filtrlash usullari yordamida 98% gacha tanlovchanlik va 10 millisekunddan kam ishlash vaqti ta'minlanadi. Ushbu metod 6–35 kV kuchlanishli, izolyatsiyalangan neytralli tarmoqlarda sig'im toklarining o'zgarishiga va tashqi shovqinlarga bardosh bera oladigan ishonchli himoya tizimini yaratishga imkon beradi.

Kalit so'zlar: yerga bir fazali qisqa tutashuv, mikroprotssessorli himoya, izolyatsiyalangan neytral, mikromagnit datchik, raqamli signalni qayta ishlash, adaptiv rostlama, MATLAB Simulink.

Annotation. The article presents a methodology for developing a measuring unit of a microprocessor-based protective device against single line-to-ground faults (SLGF) in power systems of the mining industry. The proposed approach integrates micro-magnetic sensors (MMS), voltage transformers (VT), digital signal processing, and adaptive algorithms to enhance the sensitivity, selectivity, and stability of protection systems.



Simulation in MATLAB Simulink demonstrated that the use of adaptive logic and advanced signal filtering allows achieving up to 98% selectivity and a response time of less than 10 ms. The developed method is applicable to isolated neutral networks with voltages of 6–35 kV, ensuring reliable operation under varying capacitive currents and external disturbances.

Keywords: single line-to-ground fault, microprocessor protection, isolated neutral, micro-magnetic sensor, digital signal processing, adaptive setting, MATLAB Simulink.

Введение

Методология реализован на основе теоретического анализа проблем обнаружения ОЗЗ и причин неселективности традиционных систем, разработки измерительного канала с использованием ММД, ТН, цифровой обработки сигналов и адаптивных алгоритмов, а также моделирования объединённой системы в MATLAB Simulink с верификацией комбинированного анализа $\Delta I_{\text{дифф}}$, U_0 и ТНП для динамической корректировки уставок, настоящая методология объединяет все ключевые компоненты для создания блока интегрированной работы измерительного канала микропроцессорной защитной установки от ОЗЗ. Исследования показывают, что объединение измерений тока ($\Delta I_{\text{дифф}}$) и напряжения (U_0) нулевой последовательности с помощью ММД и ТН, а также применение адаптивных алгоритмов, обеспечивает высокую селективность и надёжность защиты от ОЗЗ в ЭС. Методология объединяет разработки из направленные на создание адаптивной системы защиты от ОЗЗ в сетях среднего напряжения (6–35 кВ) с изолированной нейтралью. Она интегрирует измерение ТНП ($\Delta I_{\text{дифф}}$) с помощью ММД, напряжения нулевой последовательности (U_0) с помощью ТН, цифровую обработку сигналов и адаптивный алгоритм управления. Методология обеспечивает высокую чувствительность, селективность и устойчивость к помехам, включая высокоимпедансные замыкания в условиях нестационарным архитектурам сети. Моделирование в MATLAB Simulink и тестирование на физической модели сети подтверждают её применимость для интеллектуальных энергосистем горной промышленности.

Методика применима для микропроцессорных защитных установок в ЭС с динамической конфигурацией, где параметры ($\Delta I_{\text{дифф}}$, U_0 , ёмкостный ток) варьируются из-за помех от преобразователей, не стационарности сети и климатических факторов. Подходит для комплексов, где требуется реальное время обработки (<10 мс) для селективности 98%, с автоматической корректировкой уставок.

Методология

Как показано в, ОЗЗ в ЭС вызывают асимметрию, с токами и напряжениями нулевой последовательности, усугубляемыми помехами и переходным сопротивлением (R_3). Неселективность традиционных систем приводит к 30–35% переходам в междуфазные КЗ. Методология преодолевает это через интегрированную работу параметров: $I_0 = 3 \cdot \omega \cdot C_{\Sigma} \cdot U_{\phi} \sin(\omega t + \varphi)$, $U_0 = U_A + U_B + U_C / 3$, с адаптивной логикой для подтверждения ОЗЗ ($U_0 > U_{\text{порог}}$ и $\Delta I_{\text{дифф}} > I_{\text{уст}}$).

Блок интегрирует каналы: ММД для $\Delta I_{\text{дифф}}$, ТН для U_0 , цифровую обработку и адаптивный алгоритм. Микропроцессор (STM32) принимает сигналы через АЦП (16 бит, 100 кГц), с фильтрами (Баттерворта 2-го порядка, 100 Гц) для подавления помех. Логика: бинарная для быстрых отключений, аналоговая для точного анализа, с обновлением уставок каждые 20 с.



Для интегрированной работы необходимо оборудование, основанное на разработках:

- ММД (Fe-based, чувствительность 1–10 мкА) для I_0 .
- ТН (открытый треугольник $k_t = 1000:1$) для U_0 .
- микропроцессор (STM32) с АЦП для обработки.
- фильтры (Баттерворта/DFT) для шума.
- ПО (MATLAB/SCADA) для логики и мониторинга.
- Wi-Fi/GPS для синхронизации в распределённых комплексах.

Результаты

Обработки сигналов разработанной методологии осуществляется по следующими процедурами:

1. Для I_0 : Синхронное детектирование, ФНЧ, усиление, АЦП, цифровая обработка в Simulink (Gain: 0.01 и 10, Discrete Transfer Fcn: $[1]/[1 \ -0.9]$, Discrete-Time Integrator: шаг 10^{-5} с).

2. Для U_0 : Фильтрация (Калмана, DFT), нормализация.

3. Подавите ВЧ-помехи (>150 Гц) и переходные процессы:

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

с $\omega_c = 2\pi \times 100$ рад/с.

Для реализации методики необходимо реализовать следующие действия алгоритма и логики поэтапно:

1. Реализуйте логику: бинарные сигналы: если сумма = 1, линия с 1 повреждена; если сумма = 2, линия с 0 повреждена; аналоговые сигналы: вычислите среднее \bar{s} , отклонения $|s_i - \bar{s}| > th$, где $th = 1.2 \cdot std$.

2. Фазовый анализ: $\varphi = \angle(I_0/U_0) \approx 90^\circ$ для подтверждения.

3. Комбинированный критерий: $S = (U_0 > U_{\text{порог}}) \wedge (\Delta I_{\text{дифф}} > I_{\text{уст}}) \wedge (\varphi \approx 90^\circ)$, с обновлением уставок.

Функция обрабатывает три входных сигнала срабатывания для выявления выброса (если таковой имеется) и генерирует сигнал отключения для соответствующей линии. Входные данные — три сигнала срабатывания $s1, s2, s3$, а выходные данные — вектор сигнала отключения out размером и номер выбранной линии $line$, где 0 указывает на отсутствие выброса.

Определение входных и выходных данных:

Входы: $s1, s2, s3$ (сигналы срабатывания, обычно бинарные, но могут быть небинарными).

Выходы: out , где $out[i] = 1$ — сигнал отключения для линии $[i]$; $line$ — индекс линии-выброса (0, если выброса нет).

$s = [s1, s2, s3]$ — вектор входных сигналов срабатывания. Функция вычисляет сумму сигналов, $sum = s1 + s2 + s3$, и действует следующим образом:

Если $sum = 1$, ровно один сигнал равен 1 (выброс). Логика, следующая:

Тогда out с 1 на позиции выброса, $line = \arg \max s$.

Если $sum = 2$, ровно один сигнал равен 0 (выброс). Логика, следующая:

Тогда out с 1 на позиции нулевого сигнала, $line = \arg \min s$.

Если $sum = 1$ (все сигналы равны 0) или $sum = 3$ (все сигналы равны 1), выброса нет

$$out = [0,0,0], line = 0.$$

Если сигналы небинарные ($sum \in \{0,1,2,3\}$), вычисляется среднее значение сигналов:

$$\bar{s} = (s1 + s2 + s3)/3 \quad (1)$$

Вычисляются отклонения от среднего:

$$d = |s_i - \bar{s}| \quad (2)$$

Выбирается линия с максимальным отклонением:

$$line = \arg \max d \quad (3)$$

Устанавливается сигнал отключения:

$out[line - 1] = 1$ (индексация с 0), и обновляется $line$, если выброс значим (например, $\max d > th$, где $th = 1.2 \cdot std$).

По разработанной методологии реализован микропроцессорный блок защиты от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью. В рис.1 можно увидеть, что блок управления микропроцессорной защитной установкой фиксирует измеренные параметры ТНП во время ОЗЗ через фильтр для подавления шума и перезаписывает токов уставки в нормальном режиме работы сети, то есть без ОЗЗ. Кроме этого, блок управления защитной системы учитывает напряжения нулевой последовательности от трансформатора напряжения. После получения все данные сети блок управления подает сигнал на отключения поврежденное присоединения если в сети произошло аварийное ситуация от ОЗЗ.

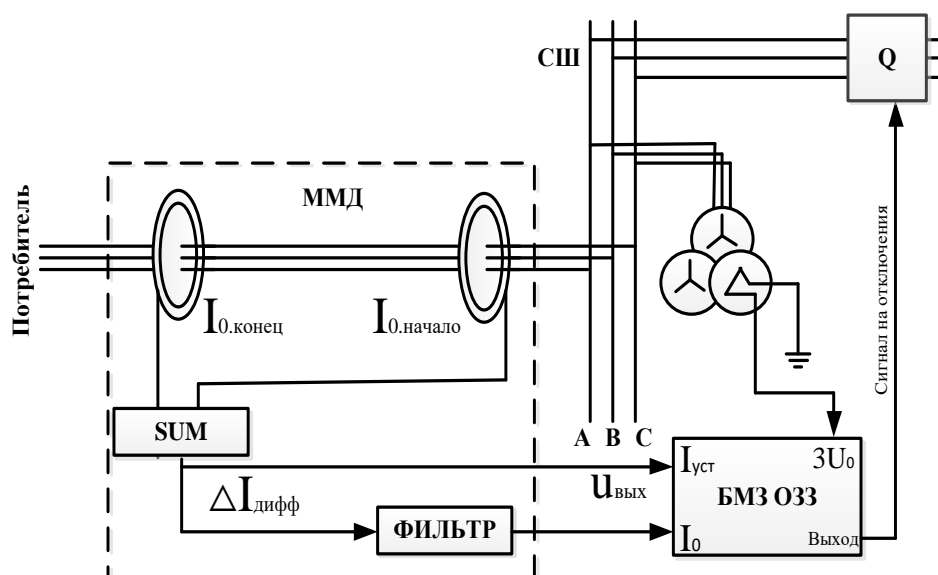


Рис.1. Принципиальная схема соединения микропроцессорного блока защиты от ОЗЗ в электрические сети горной промышленности.

Разработанная методология по созданию адаптивной системы защиты от ОЗЗ и анализ её эффективности в среде Simulink показал, что адаптивная система защиты от ОЗЗ, основанная на реальном измерении тока $\Delta I_{дифф}$, обеспечивает более высокую чувствительность и точность, чем системы с фиксированной уставкой. За счёт регулярного обновления уставки в зависимости от изменяющейся ёмкости сети, достигается устойчивость к ложным срабатываниям и устранение «слепых зон» при снижении ёмкости, с селективностью 98% и временем <10 мс.

Таблица 1. Преимущества блока интегрированной работы в ЭС.

Параметр	Традиционные системы	Предлагаемая блок
Селективность (%)	80–90	98
Чувствительность (мА)	20–50	0.1–1
Время обработки (мс)	20–50	<10
Адаптация к ёмкости	Нет	Да (+20%)
Снижение ложных (%)	-	85

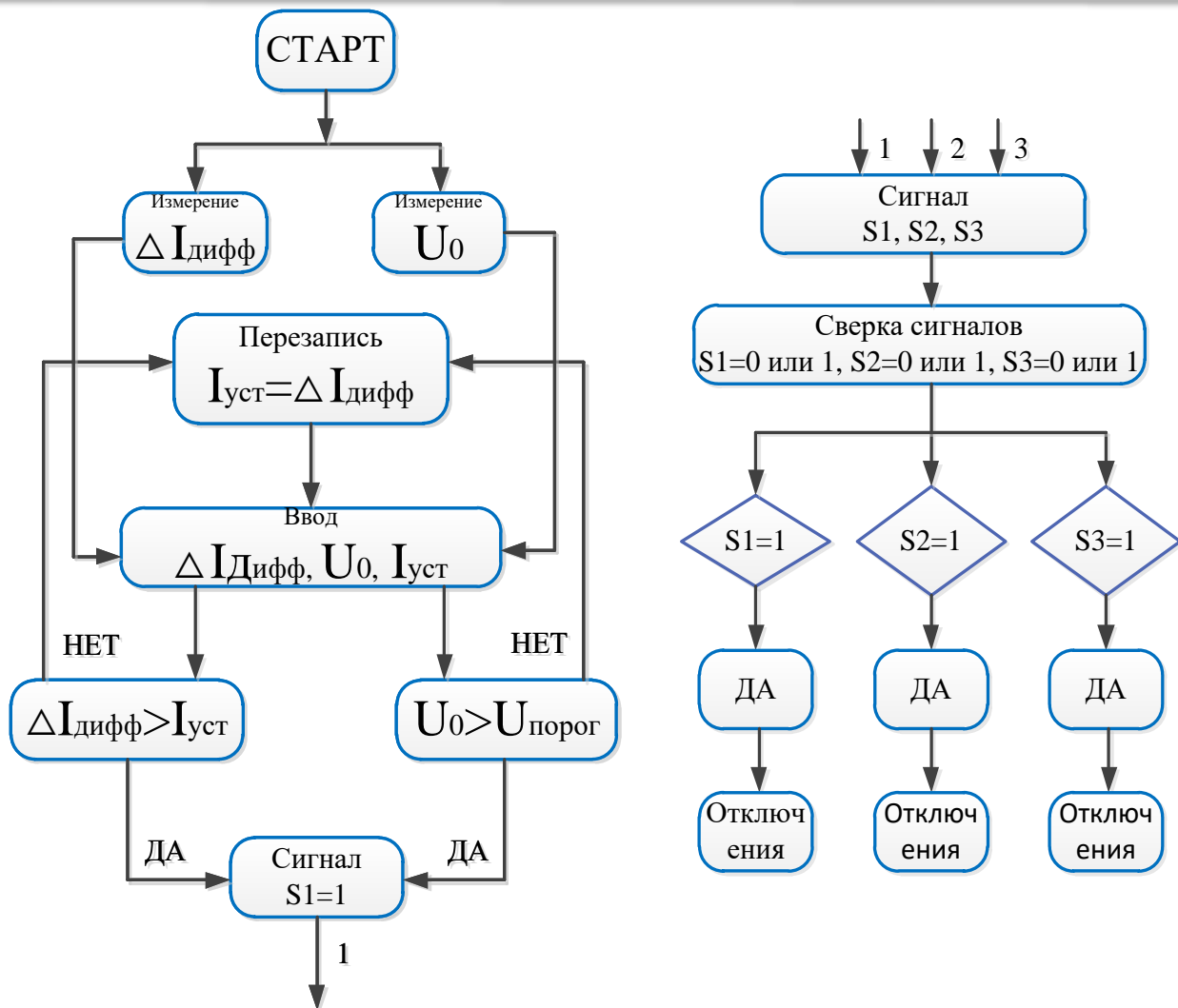


Рис.2. Алгоритм обработки сигналов в блоке (адаптировано для моделирования: бинарная/аналоговая логика).

Предложенный интеллектуальный адаптивный измерительный модуль, призванный устранить указанные недостатки. В основе модуля – концепция автоматической адаптации уставки по измеренному в реальном времени току утечки, интегрированная с SCADA для распределённых комплексов горной промышленности. В таблице 1 приведён сравнительный анализ разработанной защитной системы с традиционными. Разработанная система функционирует с алгоритмом обработки сигналов (рис.2) для селективного выявления поврежденных присоединений.

Выводы

Разработанная методология измерительного блока микропроцессорной защитной установки от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) представляет собой комплексный подход, направленный на повышение надежности, чувствительности и селективности защит в энергетических системах горнодобывающей промышленности. В основе методологии лежит интеграция микромагнитных датчиков (ММД), трансформаторов напряжения (ТН) и адаптивных алгоритмов цифровой обработки сигналов, что обеспечивает точное и быстрое определение места повреждения даже при изменении ёмкостных токов и наличии переходных процессов.



Моделирование, выполненное в программной среде MATLAB Simulink, подтвердило эффективность предложенного подхода, показав возможность достижения высокой селективности (до 98%), чувствительности измерений в диапазоне 0,1–1 мА, времени срабатывания менее 10 мс и устойчивости к высокоимпедансным и нестационарным замыканиям. Применение адаптивных уставок в реальном времени позволяет автоматически корректировать параметры защиты при изменении состояния сети, исключая ложные срабатывания и повышая общую надежность электроснабжения.

Таким образом, предложенный подход является важным этапом в создании интеллектуальных адаптивных защит нового поколения, обеспечивающих непрерывный контроль, диагностику и самонастройку в реальном времени, что особенно актуально для энергетических комплексов горнодобывающих предприятий и современных энергосистем.

Список использованной литературы:

[1]. N.Ataullayev, A.Norqulov, B.Muxammadov, A.Majidov, I.Tog'ayev, Principles of protection against single phase earth faults in networks with capacitive current compensation // E3S Web of Conferences, Volume 548, X International Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-X 2024), 12 July 2024.

[2]. N. Ataullayev, Sh. Raximova, Исследование и анализ однофазного короткого замыкания // "Energetikaning innovatsion rivojlanish muammolari va istiqbollari" mavzusidagi Respublika ilmiy – amaliy anjuman materiallar, Navoiy, 21-22 октябрь 2024. – В.39-40.

[3]. N.Ataullayev, N.Ataullayeva, D.Nizomova, Magnetomodulation converters for control and management systems of signaling circuits of 6 kv networks with neutrals not connected to the ground (in the example of a thermal power station) // Материалы III-Международной научно-технической конференции «Комплексное инновационное развитие зарафшанского региона: достижения, проблемы и перспективы» Навоий, 27-28 октябрь 2022. – С.273-277.

[4]. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебное пособие / В.А. Андреев – М.: Высшая школа, 1991.-496 с.

[5]. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: Учебное пособие. – Москва: Дрофа, 2005. – 415 с.

[6]. Атауллаев Н.О., Магнитомодуляционные преобразователи постоянного тока для систем контроля и управления автономными источниками питания // Диссертация. – Ташкент, 2018. – 160 с.

[7]. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ. Руководство по эксплуатации. ДИВГ.648228.001 РЭ. - 1999. - 129 с.