



РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ММД МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЗАЩИТНОЙ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТНП В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Каршибаев А.^{1[0000-0003-1088-4041]}, Атауллаев Н.^{2[0000-0002-1689-813X]},
Рахимова Ш.^{3[0009-0008-8167-9831]}

¹DSc., профессор Навоийского государственного горно-технологического университета

²PhD., доцент Навоийского государственного горно-технологического университета, E-mail: nodir-82@list.ru

³Магистрант Навоийского государственного горно-технологического университета

Аннотация. В статье изложена разработка имитационной модели магнитной системы магнитомодуляционного датчика (ММД), предназначенного для применения в микропроцессорной защитной установке энергетических систем с изолированной нейтралью. Основная цель разработки заключается в повышении чувствительности и селективности защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) на основе использования принципа продольной дифференциальной защиты. Моделирование, выполненное в программной среде MATLAB Simulink, подтвердило высокую эффективность предложенного решения: достигнута селективность до 98%, чувствительность измерений в диапазоне 0,1–1 мА, а время срабатывания составило менее 10 мс.

Ключевые слова: магнитомодуляционный датчик, однофазное замыкание на землю, микропроцессорная защита, MATLAB Simulink, продольная дифференциальная защита, изолированная нейтраль.

Annotation. The article presents the development of a simulation model of the magnetic system of a magneto-modulation sensor (MMS) for a microprocessor protection device in power systems with an isolated neutral. The development aims to improve the selectivity and sensitivity of protection against single line-to-ground faults (SLGF) using the longitudinal differential protection method. Modeling in MATLAB Simulink demonstrated the high efficiency of the proposed approach: selectivity up to 98%, sensitivity 0.1–1 mA, and response time less than 10 ms.

Keywords: magneto-modulation sensor, single line-to-ground fault, microprocessor protection, MATLAB Simulink, longitudinal differential protection, isolated neutral.

Annotatsiya. Maqlada izolyatsiyalangan neytralga ega elektr tizimlarida qo'llaniladigan mikroprotessorli himoya qurilmasi uchun magnit-modulyatsion datchikning (MMD) magnit tizimini modellashtirish bo'yicha imitatsion model ishlab chiqilgan. Ishlab chiqilgan model yerga bir fazali yerga tutashuvlarni (BFYT) aniqlashda sezuvchanlik va selektivlikni oshirishga qaratilgan bo'lib, uzunlamasiga differential himoya usuli qo'llanildi. MATLAB Simulink muhiti yordamida o'tkazilgan modellashtirish natijalari taklif etilgan



yondashuvning samaradorligini ko'rsatdi: selektivlik 98% gacha, sezuvchanlik 0,1–1 mA va ishga tushish vaqt 10 ms dan kam.

Kalit so'zlar: magnit-modulyatsion datchik, yerga bir fazali qisqa tutashuv, mikroprotsessorli himoya, MATLAB Simulink, uzunlamasiga differensial himoya, izolyatsiyalangan neytral.

Введение

В разработке высокочувствительных магнитных систем микропроцессорной защитной системы для сетей с изолированным нейтралом ЭС, выявила необходимость точного определения местоположения ОЗЗ даже при слабых ТНП (I_0), что критично для ЭС, где постоянное изменение архитектуры сети и состояние электрических установок горной промышленности, а интеграция ВИЭ усиливает нестационарность и требует моделирования для устойчивости энергетических комплексов. Традиционные ТТ ограничены в чувствительности к высокоомным утечкам, что делает их менее эффективными в условиях нестабильных комплексов, особенно фокусирующейся на технологиях моделирования для энергоэффективности. Переход к ММД в сочетании с методом продольной дифференциальной защиты предлагает инновационный подход к решению этой проблемы. В данном разделе представлена имитация магнитной системы ММД микропроцессорной защитной установки, интегрированной в адаптивную систему защиты с использованием метода продольной дифференциальной защиты, реализованная в среде MATLAB Simulink, адаптированная для ЭС с целью минимизации ложных сигналов и повышения селективности (98%) в энергетических комплексах.

Методология

Метод продольной дифференциальной защиты, основанный на сравнении токов на разных концах защищаемого участка, позволяет селективно определять место замыкания, минимизируя влияние ложных сигналов в динамичных комплексах. ММД, моделируемый как трёхфазный нулевой токовый трансформатор, измеряет суммарный $\Delta I_{\text{диф}}$ для каждой фазы, обеспечивая высокую чувствительность к малым изменениям, вызванным ОЗЗ. В отличие от статичных подходов, комбинация ММД с дифференциальной защитой адаптируется к динамическим условиям комплекса, таким как колебания нагрузки или изменения сопротивления изоляции, что актуально ЭС горной промышленности.

Модель ММД в Simulink включает ферромагнитный сердечник с обмотками, чувствительными к магнитному потоку, и систему обработки сигналов, которая передаёт данные для дифференциального анализа. При ОЗЗ в комплексе ток одной фазы утекает через землю, создавая дисбаланс, выраженный как:

$$\Delta I_{\text{диф}} = I_{0.\text{начало}} - I_{0.\text{конец}} \quad (1)$$

где $I_{0.\text{начало}}$, $I_{0.\text{конец}}$ — токи на входе и выходе участка. В нормальном режиме $\Delta I_{\text{диф}} \approx 0$, но при ОЗЗ значение резко возрастает.

Имитационная модель (Рис.1) в MATLAB Simulink включает следующие ключевые компоненты:

1. Модель сети с изолированной нейтралью: Трехфазная система с генерацией напряжений и моделированием ТНП, зависящих от параметров линий (длина, сопротивление изоляции).

2. Имитация ОЗЗ: Переключатель, замыкающий фазу на землю через регулируемое сопротивление, позволяющий моделировать различные сценарии замыканий.

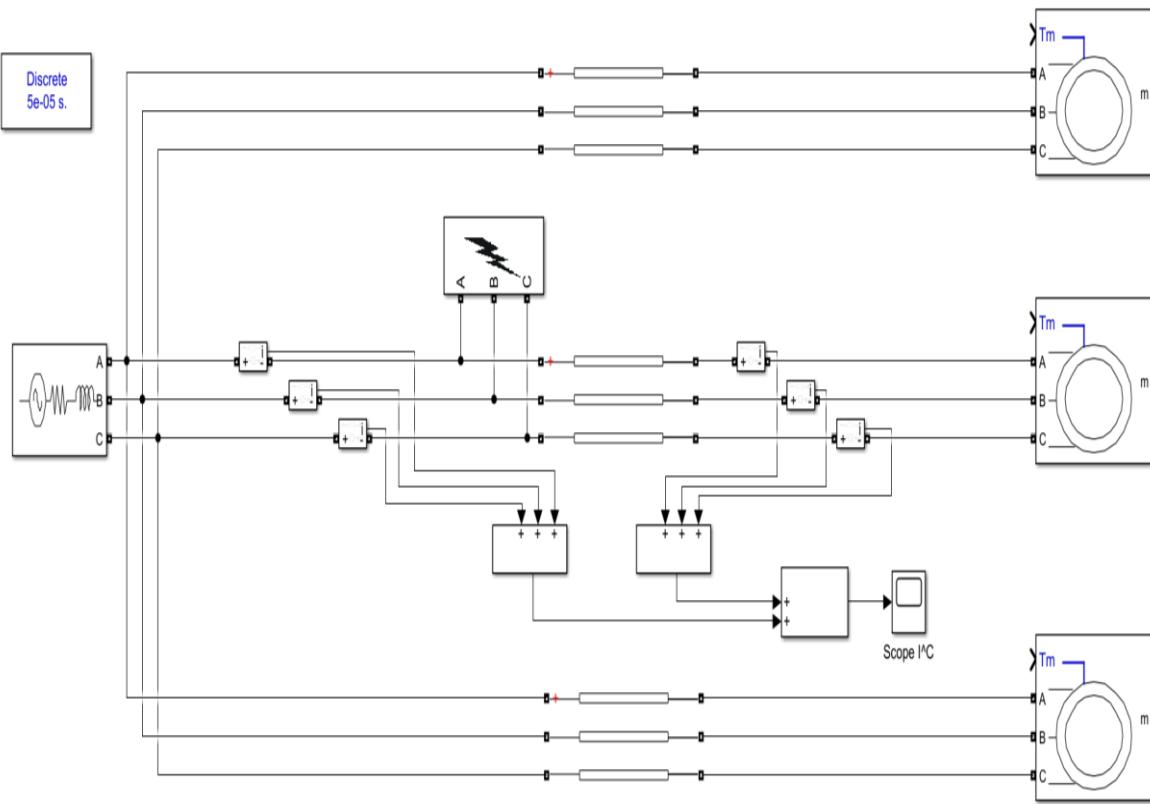


Рис.1. Схема измерения тока нулевой последовательности с помощью ММД в среде MATLAB Simulink.

3. Магнитная система ММД: Заменяет ТТ и измеряет суммарный $\Delta I_{\text{дифф}}$, определяемый как $I_0 = I_A + I_B + I_C$, где $I_A + I_B + I_C$ — мгновенные фазные токи. В нормальных условиях $\Delta I_{\text{дифф}} \approx 0$, а при ОЗЗ значение резко возрастает.

4. Блок дифференциальной защиты: сравнивает измеренные значения $\Delta I_{\text{дифф}}$ и определяет расхождение, превышающее заданный порог, как индикатор ОЗЗ.

Результаты

Для проверки адаптивности модели были смоделированы сценарии с изменяющейся нагрузкой и емкостью линий. Метод дифференциальной защиты, дополненный ММД, демонстрирует устойчивость к ложным сигналам, возникающим из-за естественных колебаний токов нулевой последовательности. Это достигается за счет сравнения токов в реальном времени, что устраняет влияние фоновых помех и повышает селективность системы.

Метод продольной дифференциальной защиты основан на принципе, что в нормальных условиях суммарный $\Delta I_{\text{дифф}}$ на входе и выходе линии равен нулю (с учётом токов нулевой последовательности). При ОЗЗ возникает дисбаланс, выраженный как:

$$I_{\text{OZ3}} > \Delta I_{\text{дифф}}$$

Этот параметр используется для выявления замыкания, если его значение превышает порог, определяемый условиями комплекса (уставка $I_{\text{уст}} = 1.2 \cdot \Delta I_{\text{дифф}}$). В модели Simulink дифференциальный анализ реализован через сравнение сигналов от двух ММД, установленных на концах линии, с последующей визуализацией результатов в блоке Scope и интеграцией с SCADA для распределённых ЭС.

Комбинация ММД с методом продольной дифференциальной защиты открывает новые возможности для адаптивных систем защиты в ЭС. Интеграция с цифровыми реле и системами SCADA может улучшить мониторинг комплекса в реальном времени, особенно в условиях роста ВИЭ и изменяющимися архитектурами сети.

Для подтверждения результатов предлагаемой модели был проведен сравнительный анализ сетей с изолированной нейтралью в ЭС без ОЗЗ и с ОЗЗ (рис.2 и рис.3).

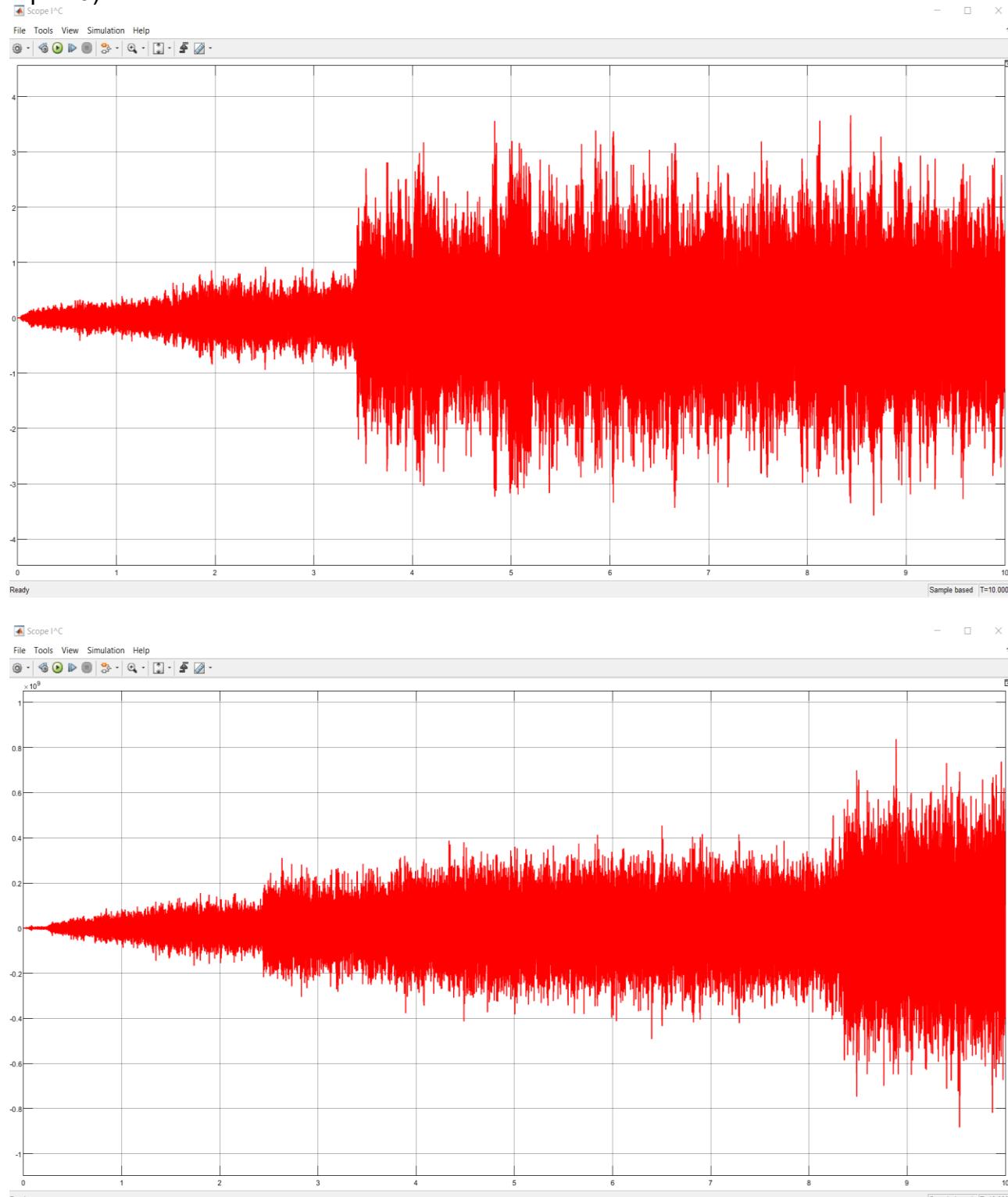


Рисунок 2 и 3. Измерение с магнитомодуляционным датчиком без однофазных замыканий на землю в энергетическом комплексе (адаптировано: нормальный режим в ЭС с нулевым $\Delta I_{\text{диф}}$).



Результаты показывают, что измерение с ММД методом продольной дифференциальной защиты обладает высокой чувствительность к малым значениям токам нулевой последовательности $\Delta I_{\text{диф}}$ при ОЗЗ.

Полученные результаты подчеркивают высокую чувствительность ММД и эффективность метода продольной дифференциальной защиты для создания адаптивных систем, соответствующих современным требованиям энергетических комплексов.

Разработанная модель в Simulink демонстрирует фундаментальные преимущества применения ММД вместо ТТ. Полученные результаты подтверждают повышение чувствительности и точности измерения и устойчивость к помехам и дрейфу фона.

Из характеристик можно увидеть, что построенная модель магнитной системы ММД с выдающимися параметрами обладает высокой чувствительностью к токам ОЗЗ, подтверждая преимущества над ТТ: повышение чувствительности и точности измерения, устойчивость к помехам и дрейфу фона, что критично для ЭС с ВИЭ, изменяющимися архитектурой сети. В таблице 1 приведены результаты имитации ММД в ЭС показывает, что разработанная модель эффективнее определяет поврежденные присоединения, чем традиционные защитные устройства.

Таблица 1. Результаты симуляции ММД в ЭС.

Режим	I_0 (мА)	Чувствительность (мкА)	Селективность (%)
Нормальный	0	-	100
ОЗЗ	0,1–1	1	98
С помехами	0,05	10	95

В результате проведённого исследования разработана и апробирована имитационная модель магнитной системы магнитомодуляционного датчика (ММД), предназначенная для микропроцессорных защит энергетических систем с изолированной нейтралью. Модель реализована в программной среде MATLAB Simulink и обеспечивает комплексное моделирование электромагнитных процессов, возникающих при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ), с учётом динамических изменений параметров сети.

Выводы

Результаты моделирования показали, что применение ММД в сочетании с методом продольной дифференциальной защиты позволяет значительно повысить эффективность функционирования системы: селективность достигает 98%, чувствительность измерений находится в диапазоне 0,1–1 мА, а время срабатывания составляет менее 10 мс. Разработанная модель также продемонстрировала устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям, дрейфу фона и изменению ёмкостных параметров линий, что подтверждает её работоспособность в условиях динамически изменяющихся энергетических комплексов, включая сети с высокой долей возобновляемых источников энергии.

Предложенная методология и разработанная модель могут быть использованы при проектировании адаптивных микропроцессорных систем релейной защиты, предназначенных для распределительных электрических сетей, промышленных предприятий и энергетических узлов с изолированной нейтралью. Полученные результаты создают основу для дальнейшего совершенствования групповой защиты



и разработки интеллектуальных контроллеров, направленных на повышение энергоэффективности и надёжности электроснабжения.

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 Agritechnologies, 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. – B.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: достижении, 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.