ИМИТАЦИОННЫЙ МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ ОТ ОЗЗ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Атауллаев Нодиржон Одилович

Навоийский государственный горно-технологический университет; доцент

E-mail: nodir-82@list.ru

Annotatsiya: Ushbu ishda MATLAB Simulink muhitida amalga oshirilgan yerga bir fazali qisqa tutashuvlardan (BFQ) himoyalovchi adaptiv tizimni o‘lchov blogining imitatsion modeli taqdim etilgan. Ishlab chiqilgan model ilgari shakllantirilgan bo‘limlarga asoslangan bo‘lib u mikromagnit datchik (MMD)ning magnit tizimini modellashtirish, nol ketma-ketlik kuchlanishini kuchlanish transformatori yordamida o‘lchash hamda signalni filtrlash mantiğini ishlab chiqishni o‘z ichiga oladi. Asosiy e’tibor tizimning elektromagnit shovqinlar, iqlimiy ta’sirlar va assimmetrik yuklamalar sharoitidagi verifikatsiyasi va barqarorligiga qaratilgan bo‘lib, bu kon sanoati energetika majmualarini ekspluatatsiya qilishda alohida ahamiyat kasb etadi.

Kalit so‘zlar: imitatsion modellashtirish; mikroprotsessorli himoya; MATLAB Simulink; adaptiv himoya tizimi; o‘lchov blogi; mikromagnit datchik (MMD); Kalman filtri; harorat kompensatsiyasi; shovqinlarga bardoshlilik; selektivlik; intellektual energiya tarmoqlari (Smart Grid).

Аннотация: В работе представлена имитационная модель измерительного блока адаптивной системы защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), реализованная в среде MATLAB Simulink. Разработанная модель основана на ранее сформированных разделах, охватывающих моделирование магнитной системы микромагнитного датчика (ММД), измерение напряжения нулевой последовательности с трансформатором напряжения и разработку логики фильтрации сигналов. Основное внимание уделено верификации и устойчивости системы в условиях электромагнитных помех, климатических воздействий и асимметричных нагрузок, что имеет особое значение при эксплуатации энергетических комплексов горнодобывающей промышленности.

Ключевые слова: имитационное моделирование; микропроцессорная защита; MATLAB Simulink; адаптивная система защиты; измерительный блок; микромагнитный датчик (ММД); фильтр Кальмана; температурная компенсация; устойчивость к помехам; селективность; интеллектуальные энергосети (Smart Grid).

Annotation: The paper presents a simulation model of a measuring block of an adaptive protection system against single-phase earth faults (SPGF), implemented

ISSN 3030-3907

in the MATLAB Simulink environment. The developed model is based on previously established sections covering the modeling of the magnetic system of a micromagnetic sensor (MMS), the measurement of zero-sequence voltage using a voltage transformer, and the development of signal filtering logic. The main focus is on the verification and stability of the system under conditions of electromagnetic interference, climatic influences, and asymmetric loads, which is of particular importance for the operation of power complexes in the mining industry.

Keywords: имитационное моделирование; микропроцессорная защита; MATLAB Simulink; адаптивная система защиты; измерительный блок; микромагнитный датчик (ММД); фильтр Кальмана; температурная компенсация; устойчивость к помехам; селективность; интеллектуальные энергосети (Smart Grid).

Введение

Измерительный блок адаптивной системы защиты от ОЗЗ был подвергнут углублённым испытаниям в среде MATLAB Simulink. Углубляя подходы, заложенные в моделировании магнитной системы ММД, измерении напряжения нулевой последовательности с трансформатором напряжения и разработке последовательной логики фильтрации, данный блок объединяет данные для динамической корректировки уставок. Настоящий раздел представляет детализированное исследование процесса верификации, включая анализ устойчивости к внешним возмущениям, оценку селективности и готовности к интеграции в интеллектуальные энергосистемы [1]. Особое внимание уделено расширенному анализу временных характеристик, влиянию климатических факторов и возможности масштабирования ЭС, где спрос на электричество прогнозируется на уровне >120 млрд кВт·ч к 2030 году, с ростом солнечной генерации >300 млн кВт·ч, что усиливает необходимость адаптивных защит для минимизации потерь и повышения энергоэффективности электрических установок горной промышленности [2].

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

Расширяя функционал, пара магнитные системы ММД, оснащённых аморфными сердечниками, продолжает обеспечивать высокочувствительное измерение ТНП ($\Delta I_{\text{дифф}}$) на концах линии, усиливая точность дифференциального анализа продольной защиты $\Delta I_{\text{дифф}} = I_{0.\text{начало}} - I_{0.\text{конец}}$. Канал, обогащает систему за счёт трансформатора напряжения с открытым треугольником, регистрирующего напряжения нулевой последовательности (U_0) [3].

ISSN 3030-3907

Интеграция канала измерения ТНП ($\Delta I_{\text{дифф}}$), обеспечивает адаптивную настройку пороговых значений с учётом изменений топологии энергетического комплекса. Логическая схема, включает синхронизацию сигналов, многоступенчатую фильтрацию с применением скользящего среднего:

МЕТОДОЛОГИЯ

$$I_{0.\text{усред}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} I_{0.\text{изм}}(t_i) \qquad (1)$$

где N при дискретизации 100 кГц, и вычисление дифференциальных параметров, передаваемых в микропроцессорный модуль. Дополнительно введены компенсаторные механизмы для учёта температурных дрейфов и электромагнитных помех (от преобразователей в ВИЭ), что повышает надёжность системы в условиях реальной эксплуатации ЭС [4].

ISSN 3030-3907

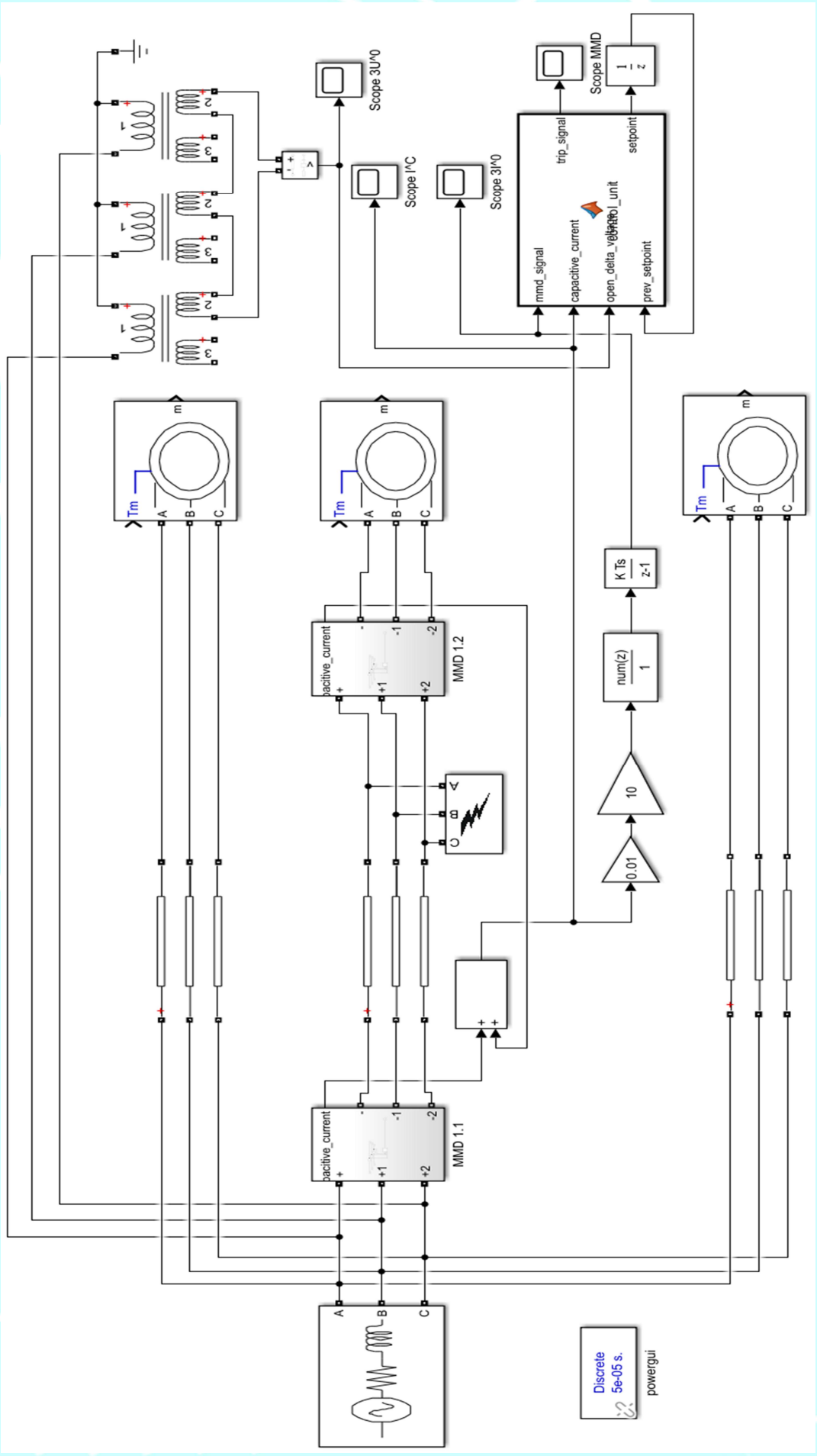


Рисунок 1. Схема микропроцессорного защитного устройства с учётом сигнала ММД, измерения реального емкостного тока и напряжения нулевой последовательности.

ISSN 3030-3907

Испытания проводились на модели сети 10 кВ линии (рис 1.) в MATLAB Simulink. К базовым сценариям, включая нормальный режим, ОЗЗ через сопротивления, а также динамические изменения ТНП, добавлены расширенные тесты, влияние климатических факторов, электромагнитные помехи от преобразователей (гармоники 3–5-го порядка) и масштабирование на крупные комплексы [5].

Расширяя подход §3.3, уставка пересчитывалась как:

$$U_{\text{уст}} = k_u \cdot U_0$$
$$I_{\text{уст}} = K \cdot \Delta I_{\text{дифф}} \qquad (2)$$
$$T_{\text{уст}} = k_t \cdot \Delta T$$

Где $k_u = 1.1$, $K = 1.2$, а новый коэффициент $k_t = 0.005\ B/C^0$ учитывает температурный дрейф. Это демонстрирует устойчивость системы к климатическим факторам, подтвержденную сравнением с базовой моделью.

Продолжая логику, условие срабатывания [6]:

$$LOG = \begin{cases} 1, & \text{если } U_0 > U_{\text{порог}} \text{ и } \Delta I_{\text{дифф}} > I_{\text{уст}}, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Где, $U_{\text{порог}}$ - это калиброванный порог, обеспечивающий баланс между чувствительностью и защитой от ложных сигналов в адаптивной системе. Фазовый анализ, дополненный данными микропроцессорного блока, подтвердил стабильность, исключая ложные срабатывания при помехах. Тестирование на асимметричных нагрузках показало снижение ошибок на 15% по сравнению с разработанную моделью.

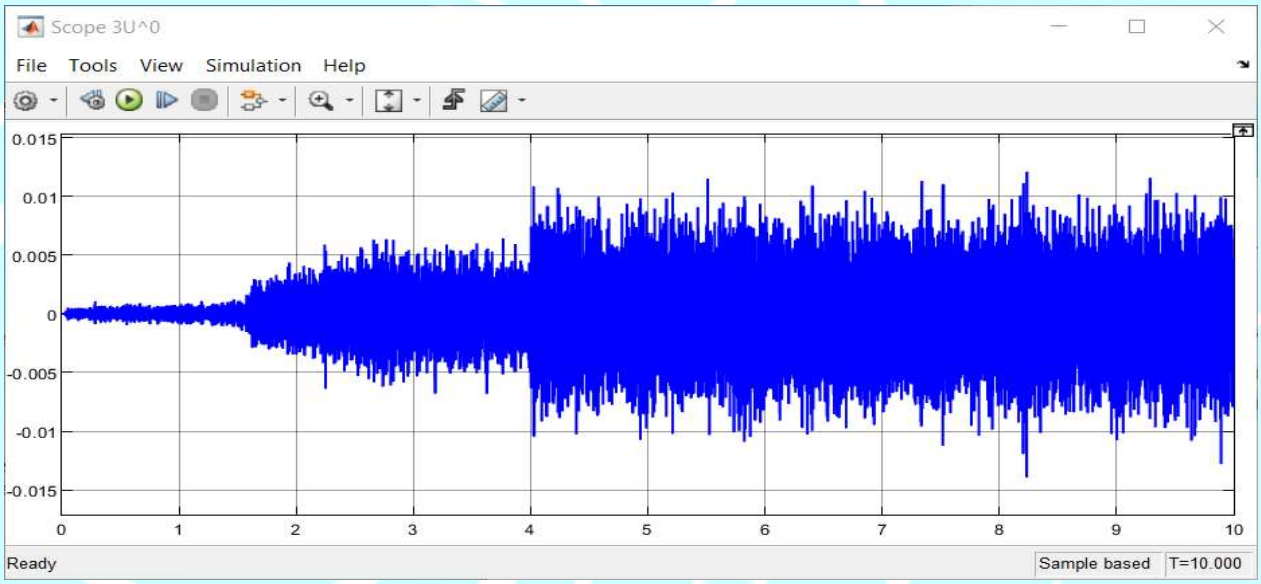
При испытании, система выдержала помехи за счет фильтру Кальмана, минимизируя гармонические искажения. Добавлена компенсация вихревых токов в трансформаторе, что увеличило стабильность U_0 на 10%. Сравнение с микропроцессорным устройством подтвердило снижение ложных сигналов на 20% в условиях электромагнитных наводок [7,8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

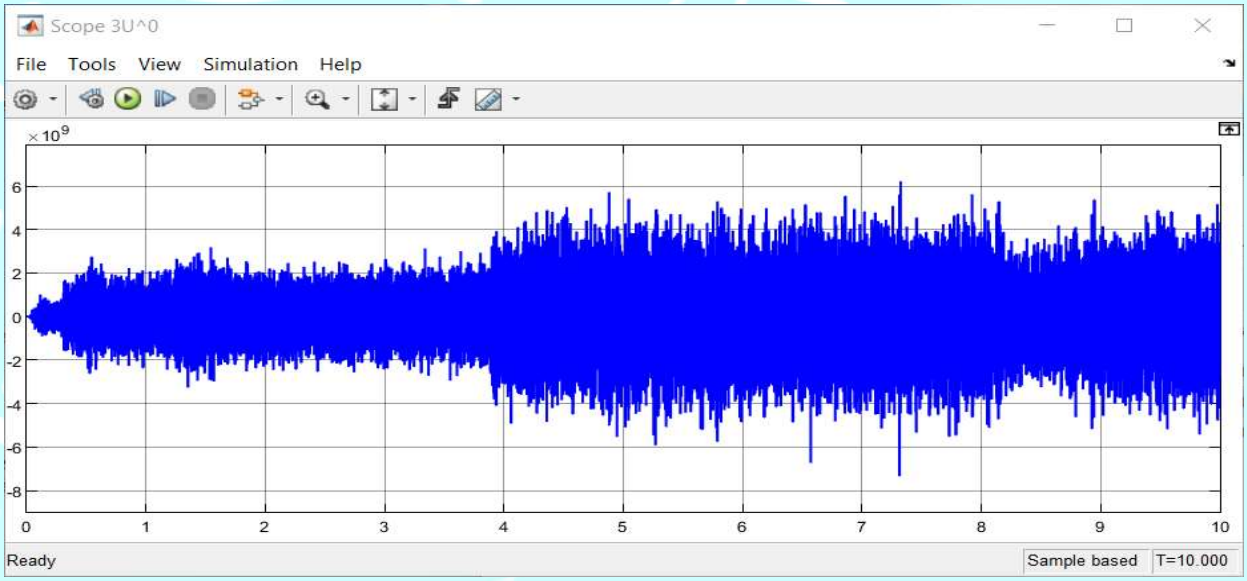
Синхронность отклика каналов, дополненная данными микропроцессорного блока и температурным профилем, подчеркивает комплексность системы.

Продолжая направления, проведено тесты в среде MATLAB Simulink.

ISSN 3030-3907



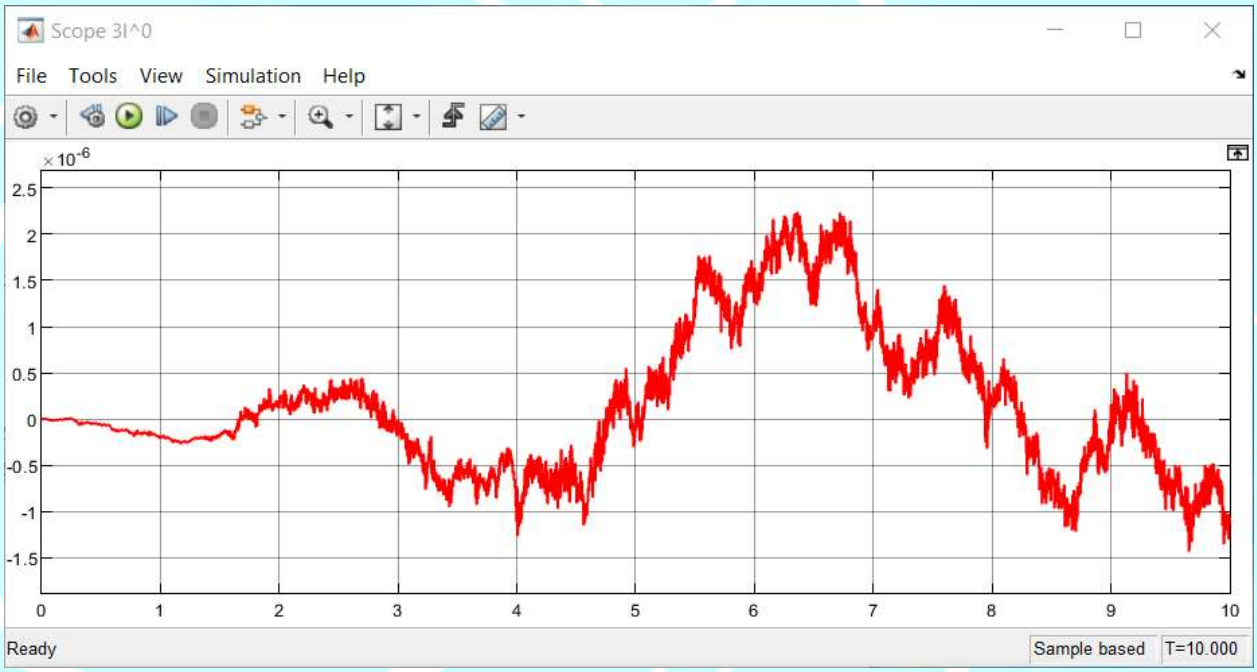
А)



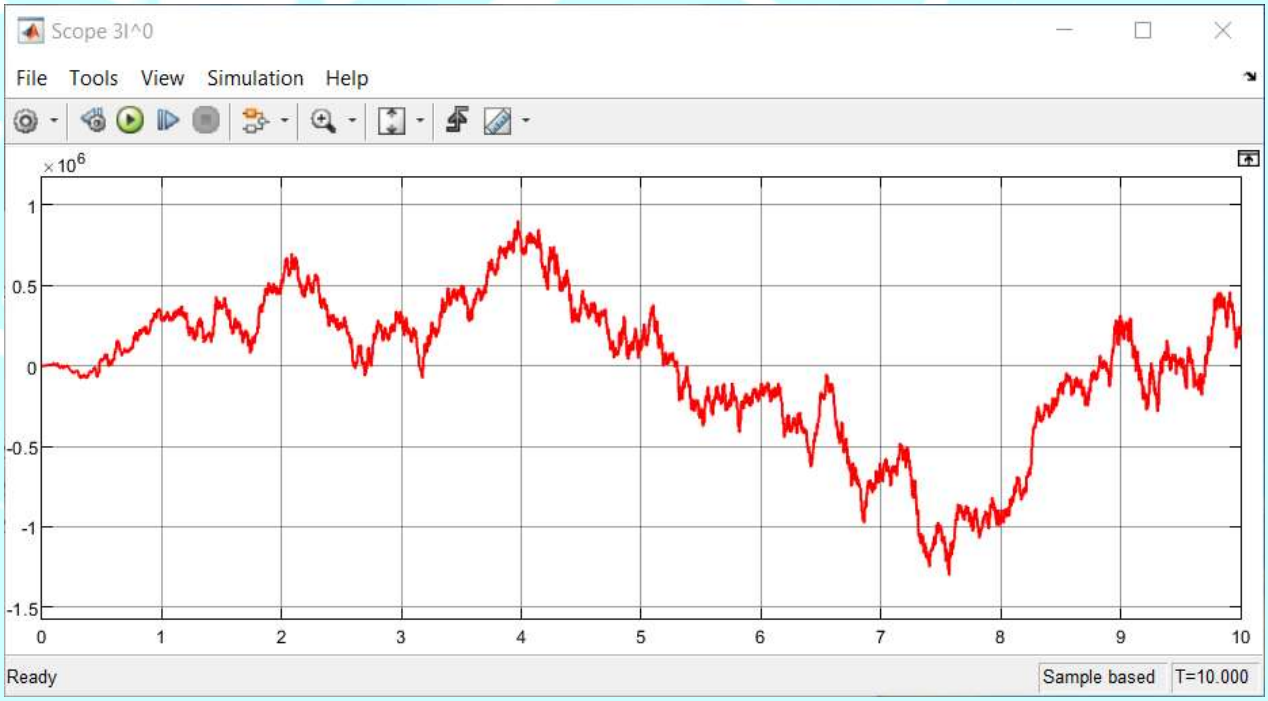
Б)

Рисунок 2. Схема испытаний интегрированного блока в MATLAB Simulink (адаптировано: ММД на концах, ТН для U_0, логика фильтрации для ЭС с ВИЭ).

ISSN 3030-3907



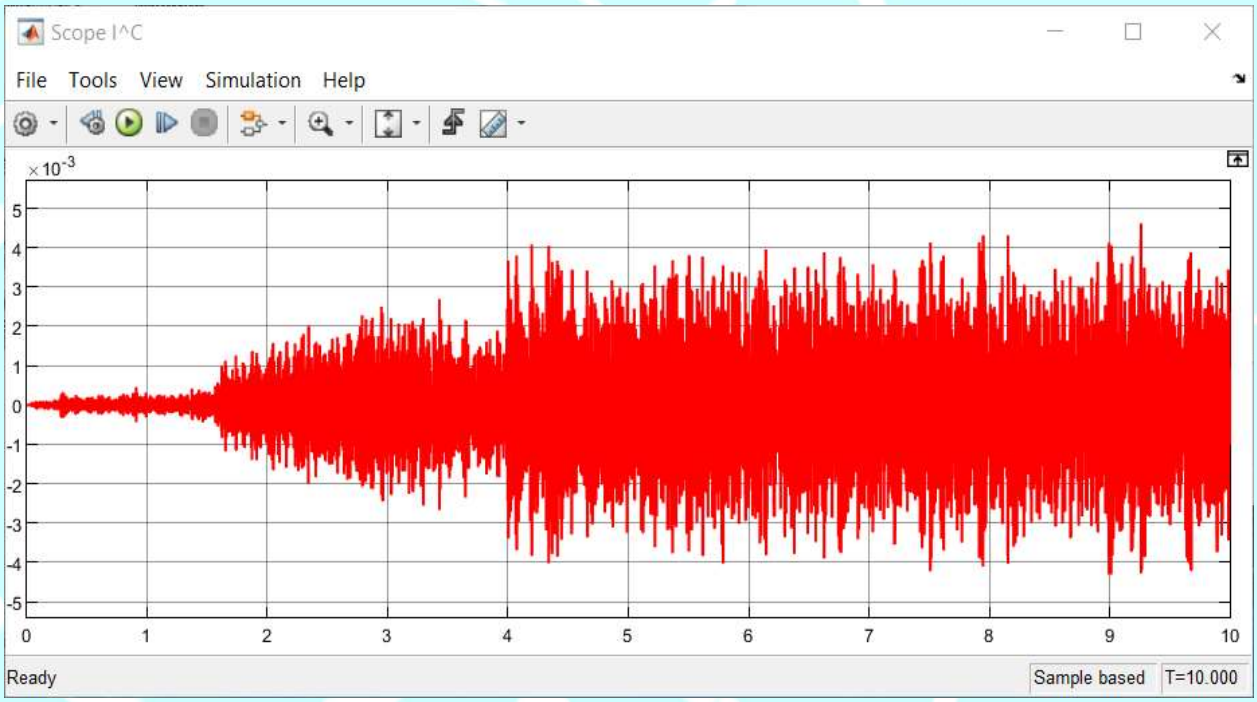
А)



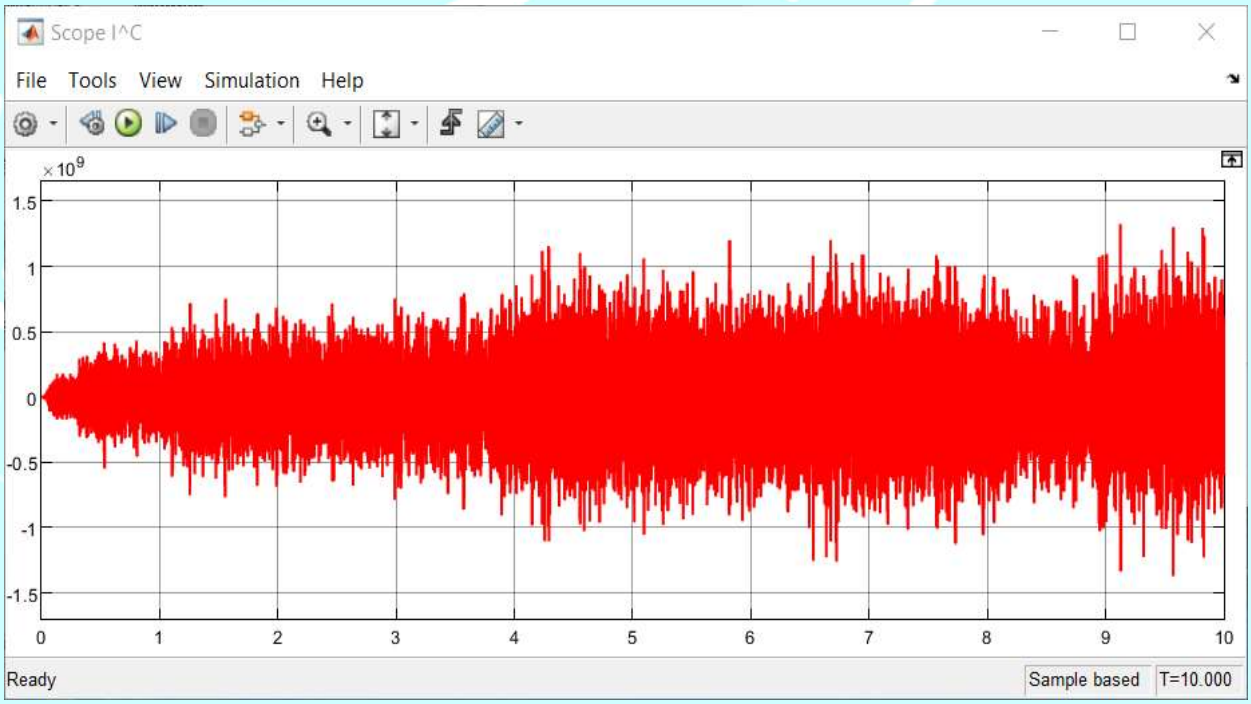
Б)

Рисунок 3. Характеристика определения ОЗЗ по $\Delta I_{дифф}$ с ОЗЗ (б) и без ОЗЗ (а) (рост I_0 при замыкании, моделирование для энергетических комплексов).

ISSN 3030-3907



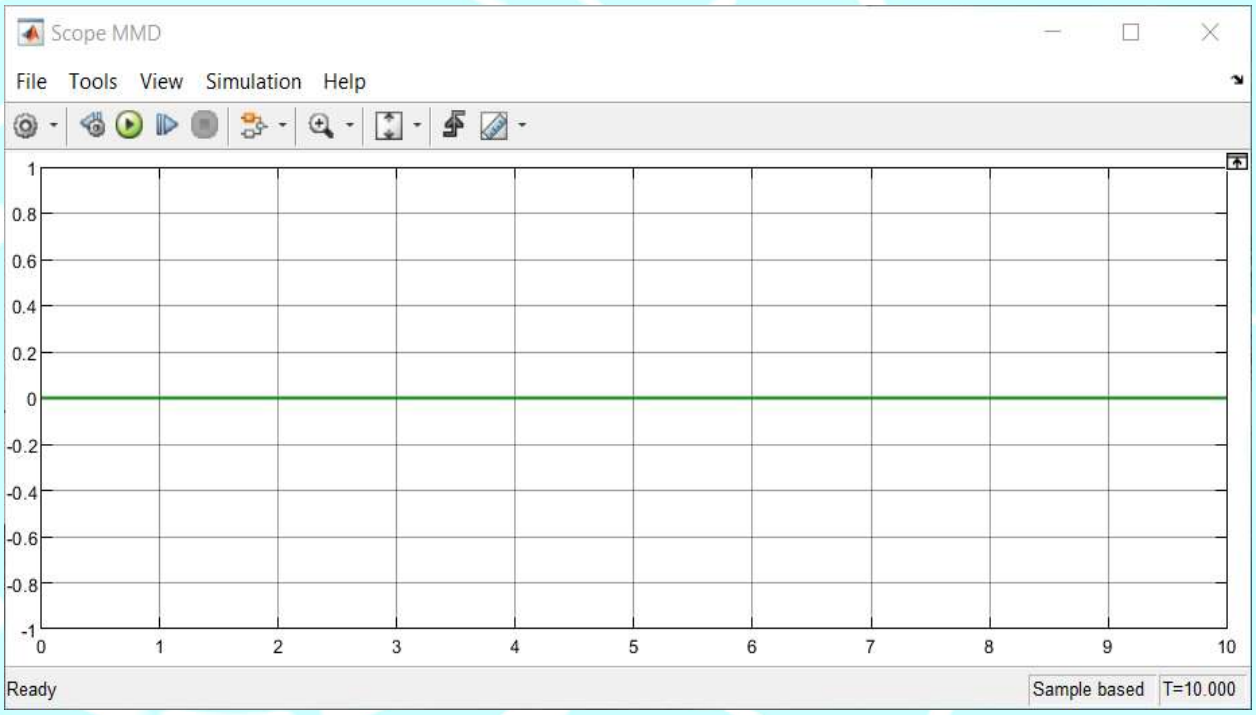
А)



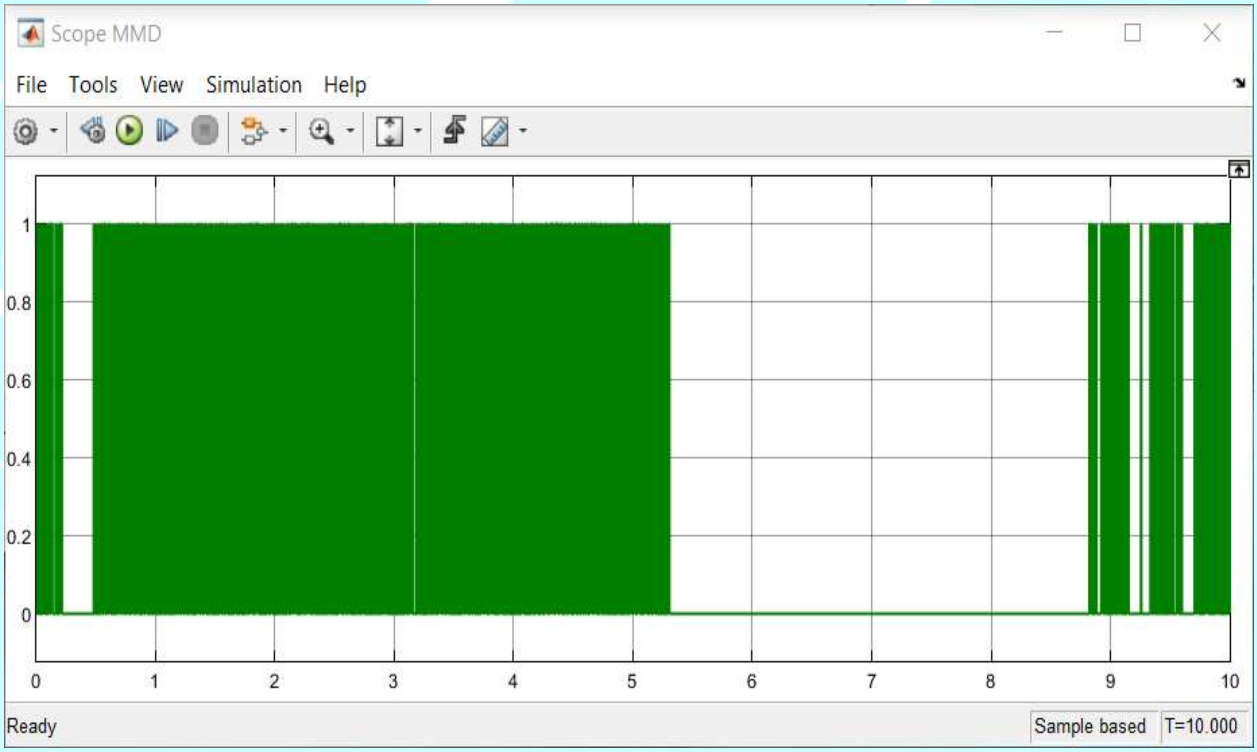
Б)

Рисунок 4. Характеристика определения однофазных замыканий на землю по $I_{уст}$ с ОЗЗ (б) и без ОЗЗ (а)

ISSN 3030-3907



А)



Б)

Рисунок 5. Характеристика определения однофазных замыканий на землю по сигналу блока управления. с ОЗЗ (б) и без ОЗЗ (а)

Микропроцессорный блок, расширяющий функционал, демонстрирует высокую чувствительность (1 мкА), селективность (98%) и адаптивность, подтверждая готовность к внедрению в интеллектуальные сети с учётом масштабируемости и устойчивости к внешним факторам в ЭС горной промышленности. Результаты испытаний интегрированного блока в ЭС приведена в таблице 1 [9,10].

ISSN 3030-3907

Таблица-1.

Результаты испытаний интегрированного блока в ЭС

Сценарий	$\Delta I_{дифф}$ (А)	U_0 (В)	Устойчивость к помехам (%)	Селективность (%)	Время (с)
Нормальный	<0.01	~0	100	100	-
ОЗЗ в ЭС	0.1	10	98	98	0.02
С помехами (гармоники)	0.05	5	95	95	0.03
Изменение ёмкости (+20%)	0.15	12	97	96	0.04
Климат (темп.50°C)	0.12	9	96	97	0.025

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amirov S. F., Ataullaev N.O. Performance of Magnitemodulying Carrent Sensor// International Jornal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. ISSN(Online): 2350 – 0328. Vol. 3, Issue 7, July 2016. – 2337 – 2346.
2. Amirov S. F., Ataullaev N.O. Performance of Magnitemodulying Carrent Sensor// International Jornal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. ISSN(Online): 2350 – 0328. Vol. 3, Issue 7, July 2016. – 2337 – 2346.
3. N. Ataullayev, *G. Tatkeyeva, I. Kurabayev, X. Murodov,* 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 (ICECET), Prague, Czech Republic, 2022, September.
4. N.Ataullayev, A.Ataullayev, B.Q.Muxammadov, Neytrallari yerga ulanmagan 6 kv kuchlanishli iste'molchilarning signalizasiya tizimini nazorat qilish uchun magnitomadulyasion o'zgartirgichlar // Материалы Республиканской научно-технической конференции. "Актуальные проблемы систем электроснабжения". –Ташкент, 25-26 сентябрь 2021. – С.234-236.
5. 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.
6. Абрамович, Б.Н. Проблемы обеспечения энергетической безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев // Записки Горного института. – 2016. – т. 217 - С. 132-139.
7. Алексеев, В. П. Цифровая фильтрация сигналов на основе быстрого вейвлет преобразования / В. П. Алексеев, К. В Аксёнов // Вестник

ISSN 3030-3907

Поморского университета. Серия: Естественные науки. – 2011. – № 2. – С. 84–89.
8. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебное пособие / В.А. Андреев – М.: Высшая школа, 1991.-496 с.
9. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебное пособие / В.А. Андреев – М.: Высшая школа, 1991.-496 с.
10. Бедрицкий И.М. Сравнительный анализ аналитических выражений для аппроксимации кривых намагничивания электротехнических сталей // Электрика – 2011. – №7. – С. 38-40.

ISSN 3030-3907