

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.316.925.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-180-187



МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СЕКЦИЙ ШИН 110 КВ НА БАЗЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УСТРОЙСТВА

Трофимова С.Н.¹, Сергеев Ю.С.¹, Платов С.И.², Толмачев Е.В.¹, Резников И.М.¹¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Решение задач обеспечения надежного электроснабжения производственного процесса невозможно без бесперебойной работы элементов энергосистемы. Современная тенденция к увеличению потребления мощности электросетевого комплекса металлургического предприятия увеличивает вероятность повышения токов короткого замыкания, что, в свою очередь, приводит к неселективной работе дифференциальной защиты сборных шин. В настоящий момент для выполнения поставленных задач наблюдается тенденция применения микропроцессорных устройств при модернизации комплексов релейной защиты и автоматики, так, например, строятся цифровые подстанции, используются новые типы трансформатора тока и т.д. Вместе с тем микропроцессорные устройства выгодны с экономической точки зрения, так как обладают большим высоким коэффициентом готовности и низким временем срабатывания.

Цель работы. Разработка модели логической части дифференциальной защиты шин на базе терминала БЭ2704 производства ООО «НПП „ЭКРА”». **Используемые методы.** При создании математической модели различных режимов работы дифференциальной защиты шин использовалось специализированное отечественное программное обеспечение. Проведен сравнительный анализ с показателями, снятыми с терминала, эксплуатирующегося в работающей энергосистеме для проверки работоспособности и точности алгоритмов дифференциальной защиты. **Новизна.** Применение моделирования работы дифференциальной защиты шин терминалами БЭ2704 в условиях конкретной подстанции для оценки правильности работы защиты при авариях и использовании полученных результатов для настройки терминалов защит, а также для обучения персонала. **Результат.** Разработана и проанализирована модель дифференциальной защиты шин терминала БЭ2704 производства ООО «НПП „ЭКРА”». Подтверждена адекватность модели путем сравнения результатов моделирования с фактическими осциллограммами срабатывания защиты. Определены оптимальные параметры дифференциальной защиты секций шин 110 кВ, обеспечивающие максимальную чувствительность и селективность при минимальном времени срабатывания. **Практическая значимость.** Применение модели позволило проверить схемы подключения, алгоритмы работы и параметры настройки терминала БЭ2704 на подстанции 110/35/6 Таганай, что исключает ошибки при внедрении и настройке оборудования на подстанции и снижает время пусконаладочных работ. Изученные режимы различных алгоритмов работы дифференциальной защиты шин позволили уже на этапе разработки алгоритма выявить принципиальные ошибки и принять меры по их устранению, что позволило сократить временные затраты на реализацию разрабатываемого оборудования.

Ключевые слова: дифференциальная защита секций шин, короткое замыкание, пусковой орган, избирательный орган, математическая модель

© Трофимова С.Н., Сергеев Ю.С., Платов С.И., Толмачев Е.В., Резников И.М., 2026

Для цитирования

Моделирование работы дифференциальной защиты секций шин 110 кВ на базе микропроцессорного устройства / Трофимова С.Н., Сергеев Ю.С., Платов С.И., Толмачев Е.В., Резников И.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 180-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-180-187>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MODELING THE OPERATION OF 110 kV BUSBAR SECTION DIFFERENTIAL PROTECTION BASED ON A MICROPROCESSOR-BASED DEVICE

Trofimova S.N.¹, Sergeev Yu.S.¹, Platov S.I.², Tolmachev E.V.¹, Reznikov I.M.¹

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Ensuring a reliable power supply for a production process is impossible without the uninterrupted operation of power system components. The current trend toward increasing power consumption in the electrical grid infrastructure of metallurgical enterprises increases the probability of higher short-circuit currents, which, in turn, may lead to non-selective operation of busbar differential protection. At present, there is a growing trend toward the use of microprocessor-based devices in the modernization of relay protection and automation systems. For example, digital substations are being implemented, and new types of current transformers are being introduced. At the same time, microprocessor-based devices are economically advantageous because they offer a high availability factor and short operating time. **Objectives.** The research is aimed at developing a model of the logic part of busbar differential protection based on the BE2704 terminal manufactured by EKRA Research and Production Enterprise LLC. **Methods Applied.** A specialized domestic software package has been used to develop a mathematical model of various operating modes of the busbar differential protection. A comparative analysis has been performed using parameters recorded by a terminal operating in an actual power system to verify the functionality and accuracy of the differential protection algorithms. **Originality.** The novelty of the study lies in modeling the operation of busbar differential protection using BE2704 terminals under the conditions of a specific substation to assess the correctness of protection operation during faults, as well as in using the obtained results to configure protection terminals and train personnel. **Result.** A model of the busbar differential protection of the BE2704 terminal manufactured by EKRA Research and Production Enterprise LLC has been developed and analyzed. The adequacy of the model has been confirmed by comparing the simulation results with actual oscillograms of protection operation. Optimal parameters of the differential protection for the 110 kV busbar sections have been determined, ensuring maximum sensitivity and selectivity with minimum operating time. **Practical Relevance.** The model makes it possible to verify the connection diagrams, operating algorithms, and setting parameters of the BE2704 terminal at the 110/35/6 kV Taganay substation. This eliminates errors during the implementation and commissioning of equipment at the substation and reduces commissioning time. Analysis of various operating modes of busbar differential protection algorithms has made it possible to identify fundamental errors at the algorithm development stage and take measures to eliminate them, thereby reducing the time required to implement the equipment under development.

Keywords: busbar section differential protection, short circuit, starting element, selective element, mathematical mode

For citation

Trofimova S.N., Sergeev Yu.S., Platov S.I., Tolmachev E.V., Reznikov I.M. Modeling the Operation of 110 kV Busbar Section Differential Protection Based on a Microprocessor-Based Device. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 180-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-180-187>

Введение

Непрерывность производственного процесса крупного металлургического предприятия – одна из важнейших задач электросетевого комплекса, которая достигается за счет осуществления безаварийного режима работы системы электроснабжения [1-5]. Технологический процесс промышленного предприятия в своей основе зависит от качества электроснабжения, которое определяется показателями его надежности и экономической эффективности. Даже кратковременная остановка электроснабжения может стать инициирующим фактором для остановки сложного технологического процесса, приводящим, в

свою очередь, к значительному экономическому ущербу. Надежность системы электроснабжения [6-8] напрямую зависит от технического состояния оборудования [9], устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), в том числе от их физического и морального износа [10].

Растущий спрос на потребление электроэнергии в различных отраслях народного хозяйства обуславливает необходимость обеспечения надежного и стабильного электроснабжения для поддержания устойчивости и эффективности функционирования экономического комплекса [11]. Задача обеспечения бесперебойности электроснабжения промышленных потребителей решается разными способами, в том числе

применением методов машинного обучения [12, 13]. Пропорционально развитию электроэнергетических систем возрастают требования к их системам защит. Развитие систем РЗА невозможно без решения задач повышения требований надежности и показателей технического совершенства – быстродействия, селективности и чувствительности [14], что позволяет эффективно выявлять дефекты оборудования на ранних стадиях, минимизировать риск аварийных ситуаций и оптимизировать эксплуатацию энергетических объектов. На сегодняшний день большинство РЗА в России представляют собой электромеханические устройства, многие из которых эксплуатируются более 25 лет [3, 12], что превышает нормативный срок службы, создавая не только риски снижения надежности энергосистемы, а значит, требует модернизации парка оборудования для повышения их надежности и безопасности.

В настоящее время имеет место устойчивая практика применения микропроцессорных (МП) устройств при модернизации комплексов РЗА [15], что обусловлено их высокой надежностью, гибкостью настройки, способностью интегрироваться в современные системы мониторинга и управления энергосистемами. МП-устройства релейной защиты (РЗ) являются пятым поколением устройств РЗ [16] и обеспечивают повышенную точность измерений, возможность реализации сложных алгоритмов защиты и автоматики, а также снижение эксплуатационных затрат за счет меньшей потребности в техническом обслуживании по сравнению с устаревшими электромеханическими аналогами. Достоинства МП-устройств: самодиагностика, совмещение функций, ускорение отключения короткого замыкания, обеспечивающие безопасность, создают преимущества перед электромеханическими (ЭМ) реле [17]. Однако широкому внедрению таких устройств препятствуют высокие первоначальные затраты, недостаток квалифицированного персонала и необходимость адаптации существующей инфраструктуры. Этим обозначается острейшая проблема российской энергетики – поддержание работоспособного состояния действующих систем защиты, а также внедрение современных систем релейной защиты и автоматики [3]. Поэтому реконструкция систем РЗА является стратегически важным шагом для обеспечения надежности энергоснабжения и оптимизации эксплуатационных процессов. Система мониторинга позволяет перейти от традиционного планового обслуживания к обслуживанию по состоянию, снижая затраты и предотвращая аварии [18].

Отказ хотя бы одной МП-защиты приводит к более тяжелым последствиям для субъекта народного хозяйства, чем неисправность электромагнитных защит, потому что МП-устройство защиты выполняет больше задач, чем электромагнитные защиты [4, 8]. Также отказ опасен еще и тем, что снижает запас динамической устойчивости электроэнергетической

системы (ЭЭС) и уровень надежности электроснабжения потребителей [6]. Сравнительный анализ алгоритмов дифференциальной защиты, оценка их эффективности и устойчивости к различным видам повреждений и режимам работы энергосистемы [19, 20] и моделирование процессов дифференциальной защиты шин дают возможность не только изучить режимы работы объектов энергетики, проверить устройства режимной и противоаварийной автоматики, но и получить основу для разработки и проверки алгоритмов действия устройств защиты, регулирования и управления процессами, происходящими в энергосистеме как в период безаварийной работы, так и в момент аварии. Решение вопросов обеспечения точности срабатывания защиты, времени реакции, устойчивости к внешним воздействиям и совместимости с существующими системами автоматизации даёт возможность проводить контроль и оценку рисков при внедрении нового оборудования в рассматриваемой энергосистеме, а также разработать рекомендации по оптимизации настройки и выбора наиболее подходящего алгоритма для конкретных условий эксплуатации.

Материалы и методы исследования

Микропроцессорные устройства РЗ различного назначения имеют много общего, а их структурные схемы подобны [21], одна из которых представлена на рис. 1.

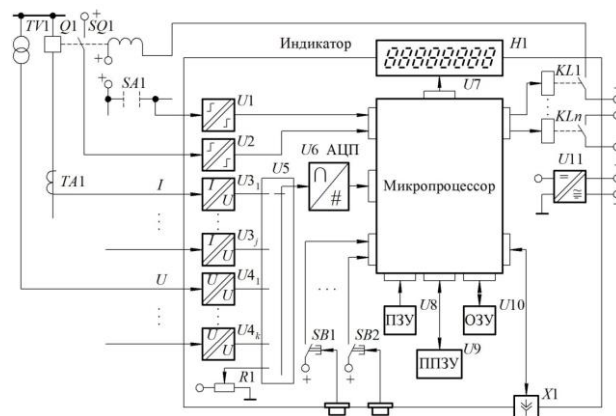


Рис. 1. Структурная схема МП-устройства релейной защиты

Fig. 1. Block diagram of a microprocessor-based relay protection device

Центральным узлом МП-устройства является микропроцессор, который через свои элементы ввода-вывода обменивается информацией с периферийными узлами. С помощью этих дополнительных узлов осуществляется сопряжение микропроцессора с внешней средой: датчиками исходной информации, объектом управления оператором и т.д. [21]. В сложных устройствах РЗ используются от 7 до 10 микропроцессоров, работающих параллельно, каждый из которых решает отдельный фрагмент общей задачи с целью обеспечения высокого быстродействия.

Неотъемлемыми элементами цифрового устройства РЗ являются: входные $U1-U4$ и выходные $KL1 - KLj$ преобразователи сигналов, тракт аналого-цифрового преобразования (АЦП) $U6, U7$, кнопки управления и ввода информации от оператора $SB1, SB2$, индикатор (дисплей) H для отображения информации и блок питания $U5$. Также современные МПУстройства оснащаются коммуникационным портом $X1$ для связи с другими устройствами [21].

Процесс преобразования (квантирования) выполняется в канале аналого-цифрового преобразования. Переход от непрерывного сигнала к дискретному всегда происходит с потерей некоторого количества информации. Конечное число градаций дискретного сигнала обуславливает погрешность квантования по уровню, а одной из причин необходимости квантования по времени является то, что и сам процесс аналого-цифрового преобразования, и последующий цикл вычислений в МПУ требуют определенного времени, по истечении которого можно делать выборку входного сигнала. Формирование выборок сигнала представлено на **рис. 2** [21].

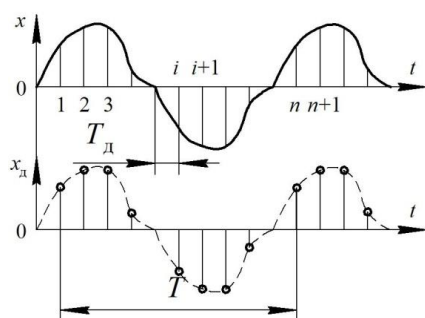


Рис. 2. График формирования выборок сигнала
Fig. 2. Signal sampling formation waveform

Основная сложность осуществления защиты шин заключается в необходимости обеспечения селективности при высоких кратностях токов внешних коротких замыканий (КЗ), обуславливающих существенные погрешности трансформатора тока (ТТ), и, с другой стороны, высокой чувствительности в минимальных режимах при незначительных токах КЗ [22].

Был проведен анализ осциллограмм срабатывания дифференциальной защиты шин (ДЗШ), полученных на модели и сравнение их с осциллограммами, полученными с терминала БЭ2704, эксплуатирующегося на подстанции 110/35/6 Таганай. Это позволило оценить корректность работы модели защиты, выявить возможные отклонения и сопоставить их с реальными условиями эксплуатации. Дифференциальная защита в терминале БЭ2704 выполнена пофазной и содержит пусковые органы, действующие при КЗ на любой из систем шин, а также избирательные органы, определяющие поврежденную систему шин (СШ) [22]. Сигнал на отключение поврежденной системы шин появляется только при срабатывании пускового (ПО) и избирательного (ИО) органов поврежденной фазы.

Осциллограммы процессов срабатывания ДЗШ, отражающие работу защиты первой секции шин, представлены на **рис. 3**. ПО через промежуточные трансформаторы тока подключены к основным ТТ всех присоединений систем шин, за исключением трансформаторов тока шиносоединительного выключателя (ШСВ). ИО с помощью тех же ТТ подключены к основным ТТ присоединений каждой системы шин, включая трансформаторы тока ШСВ [22]. При срабатывании ПО и ИО сигналы отключения действуют на выходные реле, формирующие команды отключения поврежденных систем шин. Отключение поврежденной системы шин производится следующим образом: при возникновении КЗ на первой системе шин (СШ) срабатывают реле ПО $I_d > PO1$ ДЗШ, через выдержку времени и реле ПО $I_d > IO1$ ДЗШ поврежденной фазы. Сигналы с выхода «И» (3), «ИЛИ» (4) подаются на вход «И-НЕ» (5) и при отсутствии сигнала на запрещающем входе «И-НЕ» (5) от устройства контроля исправности токовых цепей и логики опробования, ДЗШ первой секции шин действует на отключение присоединений, зафиксированных за первой системой шин. По приведенной осциллограмме срабатывания ДЗШ первой секции шин (см. **рис. 3**) видно, что в момент возникновения КЗ на линии выключателя Q09 срабатывает ИО1, а ПО1 срабатывает с выдержкой времени, равной 0,05 с.

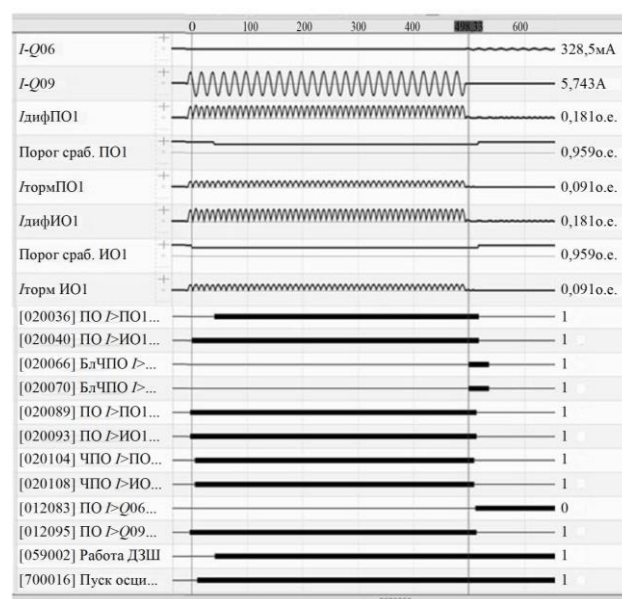


Рис. 3. Осциллограмма срабатывания ДЗШ первой секции шин
Fig. 3. Oscillogram of busbar differential protection operation for the first busbar section

В момент включения ПО1 срабатывает ДЗШ первой секции шин, а в момент срабатывания ИО1 действует запрет АПВ, через 0,001 с срабатывает чувствительный пусковой орган (ЧПО) и запускается осциллограф. Когда КЗ на выключателе Q09 устранено, срабатывает блокировка ЧПО. Действия диффе-

рениальной защиты шин с момента возникновения КЗ до момента отключения присоединения с выключателем Q09 заняли 0,5 с. Действия дифференциальной защиты шин для выключателя Q06 аналогичны.

Полученные результаты и их обсуждение

Для решения поставленных задач была разработана модель подстанции 110/35/6 Таганай с дифференциальной защитой шин с использованием отечественного программного комплекса *SimInTech*. В связи с большим объемом модели представим модель только логической части дифференциальной защиты шин терминала БЭ2704 (рис. 4). Эта модель на основе изучения свойств и поведения терминала БЭ2704 дает возможность детально исследовать функциональные характеристики терминала и оценить его работоспособность при различных условиях эксплуатации, поскольку неправильные действия РЗА приводят к большому ущербу для энергосистемы [7, 18, 23]. Модель позволяет проверить функционирование устройства в условиях, приближенных к реальным, проанализировать разные аварийные ситуации, поведение энергосистемы, а также она может использоваться для обучения персонала [7].

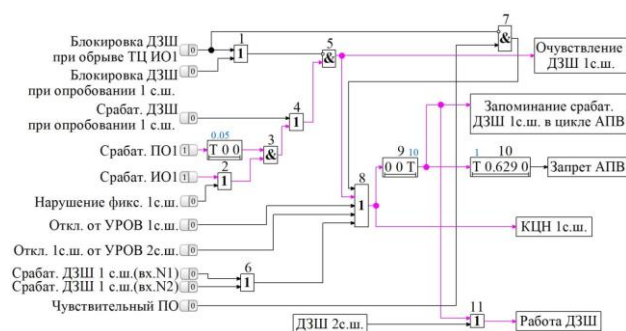


Рис. 4. Модель логической схемы ДЗШ

Fig. 4. Model of the busbar differential protection logic circuit

Результат работы логической схемы ДЗШ – временная диаграмма состояния логических элементов схемы (включение/выключение реле) – представлен на рис. 5.

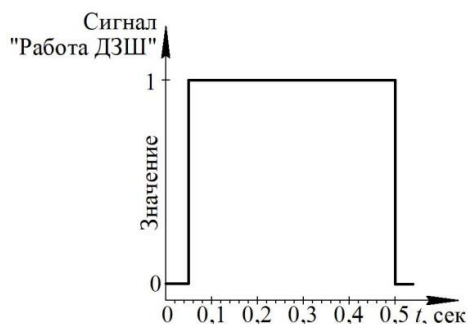


Рис. 5. Осциллограмма срабатывания ДЗШ

Fig. 5. Oscillogram of busbar differential protection operation

На осциллограмме видно, что дифференциальная защита шин сработала в момент времени $t = 0,05$ с, а протекание тока короткого замыкания на секции шин прекратилось в момент времени $t = 0,5$ с. При анализе полученной осциллограммы в ходе моделирования логической части ДЗШ выявлено, что результат соответствует работе терминала в условиях эксплуатации в энергосистеме, а это, в свою очередь, подтверждает адекватность модели.

Применение компьютерного моделирования работы логической части ДЗШ значительно упрощает контроль и анализ режимов работы дифференциальной защиты. Быстрота реакции микропроцессорной защиты на возникновение аварийных ситуаций сокращает время устранения неполадок, что напрямую влияет на увеличение коэффициента готовности (K_r) ДЗШ – важного показателя надежности энергосистемы, который характеризует способность защиты выполнять свои функции в любой момент времени. В случае недоотпуска электроэнергии ущерб зависит как от времени перерыва и значения ограничения, так и от числа случаев перерыва питания [5]. Коэффициент готовности показывает вероятность того, что устройство будет работоспособно в произвольный момент времени, кроме периодов выполнения планового технического обслуживания (ТО). Высокий коэффициент готовности свидетельствует о надежной и эффективной работе ДЗШ, минимизируя риски отказов и повышая общую безопасность энергосистемы.

Повышение K_r приводит к снижению вероятности ложных отключений, снижению времени простоя оборудования, повышению надежности электроснабжения потребителей. Снижение времени срабатывания $T_{ср}$ позволит: ограничить величину тока КЗ, протекающего через оборудование; уменьшить термическое воздействие тока КЗ; повысить устойчивость энергосистемы; повысить безопасность персонала. Коэффициент готовности K_r для дифференциальной защиты секций шин, выполненной на электромеханической и микропроцессорной базе за год, рассчитаем по формуле

$$K_r = \frac{T_0}{T_0 + T_B}, \quad (1)$$

где T_0 – средняя наработка на отказ за год, $T_0 = 8760$ ч; T_B – среднее время восстановления одного отказа.

$$K_{r(ЭМ)} = \frac{8760}{8760 + (0,1 \cdot 24)} = 0,999726;$$

$$K_{r(МП)} = \frac{8760}{8760 + (0,01 \cdot 4)} = 0,99995.$$

Сравнение показателей надежности дифференциальной защиты секций шин, выполненной на различной базе, показано в таблице.

Таблица. Сравнение показателей надежности
Table. Comparison of reliability indicators

Параметр	Вероятность отказа	Время восстановления	Расчетный K_r	ΔK_r , %	Время срабатывания $T_{ср}$, мс
Электромеханическая ДЗШ	0,1	24 ч	0,99726	0,3	100
Микропроцессорная ДЗШ	0,01	4 ч	0,99995		20

В итоге технически обосновано, что замена электромеханической дифференциальной защиты секций шин на микропроцессорную ДЗШ приведет к: существенному повышению надежности защиты (увеличению K_r); значительному снижению времени срабатывания (уменьшению $T_{ср}$); повышению чувствительности и точности защиты; расширению функциональных возможностей. А поскольку в совокупности эти преимущества обеспечивают повышение надежности и безопасности электроснабжения, снижение риска повреждения оборудования, а также снижение затрат на обслуживание, то с технической точки зрения замена ЭМ ДЗШ на МП ДЗШ является целесообразной и обоснованной.

Заключение

В рамках проведенной работы реализована модель ДЗШ подстанции 110/35/6 Таганай на основе терминала БЭ2704 с помощью отечественного программного комплекса *SimInTech*. Рассчитаны показатели надежности – коэффициент готовности и время срабатывания защиты. Оптимизация конфигурации и настроек защиты посредством модели позволяет снизить время пусконаладочных работ на реальных объектах, уменьшить время простоя оборудования и минимизировать риски аварийных ситуаций. Это особенно важно для крупных энергообъектов, где стабильность и бесперебойность работы имеют критическое значение. Результаты исследования могут быть использованы для модернизации существующих систем релейной защиты и повышения общей эффективности функционирования энергетических комплексов.

Список источников

- Бондарев А.В., Федоров С.В., Богданов А.В. Микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматизации в электроэнергетических системах: учебное пособие. Казань: Бук, 2020. 99 с.
- Исследование эффективности работы делительной автоматики в системе электроснабжения промышленного предприятия черной металлургии / О. В. Газизова, А. В. Малафеев, В. М. Тарасов и др. // Промышленная энергетика. 2012. № 10. С. 12–17.
- Жраков С.В., Зацепина В.И. Внедрение микропроцессорных устройств релейной защиты в электроэнергетическую систему России // Modern Science. 2020. № 12-3. С. 246-248.
- Разработка моделей дифференциальных защит сборных шин в программном комплексе PSCAD / П.А. Звада, Шагимарданов П.Д., Тучина Д.С., Стребкова Т.В., Дзыбов Д.Р. // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований – 2022: материалы XXIX международной научно-практической конференции. Bengaluru, 2022. С. 123-132.
- Ковалёв Д. В. Анализ методов выбора комплектов защит для терминалов релейной автоматики // Автоматика и вычислительная техника в промышленности. 2022. №4. С. 34-40.
- Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе / С.Л. Кузнецов, А.А. Дегтярев, Н.А. Дони и др. // Релейная защита и автоматизация. Серия «Наука». 2019. №1 (34). С. 28-36.
- Новаш И. В. Моделирование энергосистем и испытание устройств релейной защиты в режиме реального и модельного времени // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. №3. С. 198-210.
- Сафина З. Р., Хусаинова Е.А. Микропроцессорные устройства релейной защиты // Научный альманах. 2020. № 11-2(73). С. 97-99.
- Validation of diagnostic monitoring technical state of iron and steel works transformers / Khramshin V.R., Nikolayev A.A., Evdokimov S.A., Kondrashova Y.N., Larina T.P. // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2016. Pp. 596–600. DOI: 10.1109/EICONRUSNW.2016.7448253.
- Сипягина П. С. Анализ существующих методов и средств расчёта устройств релейной защиты и автоматики // Молодой ученый. 2023. № 38 (485). С. 19-21.
- Скубакова С. А. Внедрение современных микропроцессорных терминалов РЗА // Актуальные проблемы науки и техники: сборник научных статей по материалам XIII Международной научно-практической конференции. Уфа: ООО «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2023. С. 89-94.
- СТО 34.01-4.1-011-2020. Стандарт организации группы компаний «Россети». Рекомендации по модернизации, реконструкции и замене длительно эксплуатирующихся устройств релейной защиты и автоматики энергосистем. ПАО «Россети». 2020. 48 с.
- Таваров С.Ш., Сидоров А.И., Толстоухова И.А. Анализ моделей и методов машинного обучения в задачах прогнозирования электропотребления // Известия Тульского государственного университета. 2024. №7. С. 153-156.
- Таубес И.Р. Дифференциальная защита шин 110-220 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 96 с.
- Baishev Yu.T., Kugusheva N.N. Development of a model of a microprocessor relay protection and automation device in MatLab // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2022, no. 33, pp. 39-43. DOI: 10.26160/2474-5901-2022-33-39-43.
- Тойдеряков Н.А., Кошельков И.А. Создание и применение модели дифференциальной токовой защиты

- шин с использованием цифрового комплекса моделирования реального времени // Электроэнергетика глазами молодежи – 2016: материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3-х т. Т. 1. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. С. 411-414.
17. Федоров В.А. Библия релейной защиты и автоматики. Новосибирск: Изд-во НИПК, 2004. 278 с.
18. Шабад М.А., Левуш Е.В. Изучение цифровых реле на персональном компьютере: учебное пособие. Санкт-Петербург: Минэнерго, 2001. 42 с.
19. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
20. Шумов М.Е., Гусев Ю.А. Модернизация системы РЗА на подстанции 220/110 кВ в рамках цифровой трансформации // Молодой учёный. Серия «Технические науки». 2025. №3(554). С. 52–57.
21. Ушаков В.Я. Современные проблемы электроэнергетики: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 447 с.
22. Шмурьев В.Я. Цифровые реле защиты. М.: НТФ «Энергопрогресс», 1999. 56 с.
23. Шкаф защиты сборных шин типа ШЭ2607 065. Руководство по эксплуатации. Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА», 2023. 278 с.
7. Novash I.V. Modeling of power systems and testing of relay protection devices in real and model time. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh oyedineniy SNG* [Energy. News from higher education institutions and energy associations of the CIS]. 2017;(3):198-210. (In Russ.).
8. Safina Z.R., Khusainova E.A. Microprocessor-based relay protection devices. *Nauchnyy almanakh* [Scientific almanac]. 2020;(11-2(73)):97-99. (In Russ.)
9. Khramshin V.R., Nikolayev A.A., Evdokimov S.A., Kondrashova Y.N., Larina T.P. Validation of diagnostic monitoring technical state of iron and steel works transformers. 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. 2016:596-600. DOI: 10.1109/EICONRUSNW.2016.7448253.
10. Sipiyagina P.S. Analysis of existing methods and means for calculating relay protection and automation devices. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2023;(38(485)):19-21. (In Russ.)
11. Skubakova S.A. Implementation of modern microprocessor terminals for relay protection and automation. Aktualnyye problemy nauki i tekhniki: Sbornik nauchnykh statey po materialam XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current issues in science and technology. Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference]. Ufa: LLC Scientific Publishing Center Bulletin of Science, 2023, pp. 89-94. (In Russ.)
12. State standard GOST 34.01-4.1-011-2020. Rosseti Group of Companies Organization Standard. Recommendations for the modernization, reconstruction, and replacement of long-term power system relay protection and automation devices. PJSC Rosseti, 2020, 48 p. (In Russ.)
13. Tavarov S.Sh., Sidorov A.I., Tolstoukhova I.A. Analysis of machine learning models and methods in electricity consumption forecasting tasks. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [News of Tula State University]. 2024;(7):153-156. (In Russ.)
14. Taubes I.R. *Differentsialnaya zashchita shin 110-220 kV* [Differential protection of 110-220 kV busbars]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 96 p. (In Russ.)
15. Baishev Yu.T., Kugusheva N.N. Development of a model of a microprocessor relay protection and automation device in MatLab. Journal of Advanced Research in Technical Science. 2022;(33):39-43. DOI: 10.26160/2474-5901-2022-33-39-43.
16. Toyderyakov N.A., Koshelkov I.A. Creation and application of a model of differential current protection of buses using a digital real-time modeling complex. *Elektroenergetika glazami molodezhi* – 2016: Materialy VII Mezhdunarodnoy molodozhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Electric Power Industry through the Eyes of Youth – 2016. Proceedings of the VII International Youth Scientific and Technical Conference]. Kazan: Kazan State Power Engineering University, 2016, vol. 1, pp. 411-414. (In Russ.)
17. Fedorov V.A. *Bibliya releyroy zashchity i avtomatiki* [The Bible of relay protection and automation]. Novosibirsk: NIPK, 2004, 278 p. (In Russ.)
18. Shabad M.A., Levush Ye.V. *Izucheniye tsifrovyykh rele na personalnom kompyutere: uchebnoye posobiye* [Study of digital relays on a personal computer: a tutorial]. Saint Petersburg: Ministry of Energy, 2001, 42 p. (In Russ.)

References

1. Bondarev A.V., Fedorov S.V., Bogdanov A.V. *Mikroprotsessornyye ustroystva releyroy zashchity i avtomatizatsii v elektroenergeticheskikh sistemakh: uchebnoye posobiye* [Microprocessor-based relay protection and automation devices in electric power systems: a tutorial]. Kazan: Buk, 2020, 99 p. (In Russ.)
2. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Tarasov V.M. et al. Study of the efficiency of dividing automation in the power supply system of an industrial ferrous metallurgy enterprise. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy]. 2012;(10):12-17. (In Russ.)
3. Zhrakov S.V., Zatssepina V.I. Implementation of microprocessor-based relay protection devices in the Russian electric power system. *Modern Science* [Modern Science]. 2020;(12-3):246-248. (In Russ.)
4. Zvada P.A., Shagimardanov P.D., Tuchina D.S., Strebkova T.V., Dzybov D.R. Development of busbar differential protection models in the PSCAD software package. *Aktualnyye napravleniya fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy* – 2022: Materialy XXIX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current areas of fundamental and applied research – 2022. Proceedings of the XXIX international scientific and practical conference] Bengaluru, 2022, pp. 123-132. (In Russ.)
5. Kovalev D.V. Analysis of methods for selecting protection kits for relay automation terminals. *Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika v promyshlennosti* [Automation and computing in industry]. 2022;(4):34-40. (In Russ.)
6. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A., Doni N.A. et al. Analysis of non-selective actions of differential protection of busbars during external single-phase short circuits with saturation of the current transformer in the undamaged phase. *Reley'naya zashchita i avtomatizatsiya. Seriya «Nauka»* [Relay protection and automation. Science Series]. 2019;(1 (34)):28-36. (In Russ.)

19. Shneyerson E.M. *Tsifrovaya releynaya zashchita* [Digital relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 2007, 549 p. (In Russ.)
20. Shumov M.E., Gusev Yu.A. Modernization of the relay protection and automation system at the 220/110 kV substation within the framework of digital transformation. *Molodoy uchenyy. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»* [Young scientist. Series Engineering Sciences]. 2025;3(554):52-57. (In Russ.)
21. Ushakov V.YA. *Sovremennyye problemy elektroenergetiki: uchebnoye posobiye* [Modern problems of electric power industry: a textbook]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2014, 447 p. (In Russ.)
22. Shmuryev V.YA. *Tsifrovyye rele zashchity* [Digital protection relays]. Moscow: NTF Energoprogress, 1999, 56 p. (In Russ.)
23. Busbar protection cabinet type ШЭ2607 065. Operation manual. Cheboksary: ООО NPP EKRA, 2023, 278 p. (In Russ.)

Поступила 29.12.2025; принята к публикации 15.05.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 29/12/2025; revised 15/05/2026; published 30/09/2026

Трофимова Светлана Николаевна – кандидат технических наук, доцент,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: trofimovasn@susu.ru ORCID 0000-0002-6803-9564

Сергеев Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: sergeevys@susu.ru ORCID 0000-0003-1028-8346

Платов Сергей Иосифович – доктор технических наук, заведующий кафедрой,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mitodim@magtu.ru ORCID 0000-0002-4868-4881

Толмачев Евгений Владимирович – старший преподаватель,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: tolmatchev@susu.ru ORCID 0009-0004-4960-6828

Резников Иван Максимович – студент,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: shkola2154@yandex.ru; ORCID 0009-0006-6396-0019

Svetlana N. Trofimova – PhD (Eng.), Associate Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: trofimovasn@susu.ru ORCID 0000-0002-6803-9564

Yuriy S. Sergeev – PhD (Eng.), Head of Department,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevys@susu.ru ORCID 0000-0003-1028-8346

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Head of Department,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mitodim@magtu.ru ORCID 0000-0002-4868-4881

Evgeniy V. Tolmachev – Senior Lecturer,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: tolmatchev@susu.ru ORCID 0009-0004-4960-6828

Ivan M. Reznikov – Student,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: shkola2154@yandex.ru ORCID 0009-0006-6396-0019