

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ ТЯГОВОЙ СЕТИ КАРЬЕРНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

С. М. Кузнецов¹, С. Н. Андрияшин¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Проблема надежного функционирования защит фидеров тяговой сети постоянного тока возникла с момента начала развития электрического транспорта, роста мощности электроподвижного состава и скоростей движения. Для ее решения развитыми странами предложены сотни устройств, направленных на повышение надежности функционирования, но полностью задача до настоящего времени не решена, а многие предложения (патенты) так и остались не реализованными, в том числе и на тяговых подстанциях горнодобывающих предприятий (ГДП) и электроподвижном составе карьерного железнодорожного транспорта (ЭПС) [1,2]. Причина в том, что все типы защит реагировали на один параметр: ток, напряжение, сопротивление, нагрев токоведущих частей и другие. Создание цифровых устройств позволило создать комплекты защит, реагирующих на несколько признаков переходного процесса в тяговой сети, а их совместное возникновение может характеризовать аварийный режим и выдать команду на отключение линии (фидера). Диапазон возможных значений установившихся токов короткого замыкания (КЗ) достаточно широк [3–5]. Авторами определены, в отдельных режимах уточнены в мониторинге значения токов КЗ, и особенно скорости изменения тока (di/dt), которые могут быть использованы как признак КЗ в сочетании с другими факторами в цифровых защитах. Установлено, что при пробое изоляции или силовых полупроводниковых приборов (СПП) в преобразователях тяговых подстанций ток КЗ зависит от параметров схемы внешнего электроснабжения и преобразовательного агрегата и может достигать 20...80 кА. Опыт эксплуатации комплектов в составе классической максимально-импульсной защиты (МИЗ) и многоканального цифрового терминала (Inter) выявил сложности в выборе типов защит цифрового терминала, определении зоны их действия и уставок, а также согласовании с МИЗ. Малые токи удаленных КЗ также представляют опасность для электрооборудования, так как в подавляющем большинстве случаев в месте КЗ возникает электрическая дуга, падение напряжения в которой составляет 200...500 В, в месте КЗ выделяется большое количество тепла. В результате исследований, проведенных для Западно-Сибирской железной дороги, предложен алгоритм настройки уставок защит терминала и МИЗ, определения зон их действия на основе математического моделирования и использования мониторинга режимов работы тяговой сети, что позволило значительно повысить надежность функционирования комплекта защиты. Таким образом, при любых видах нарушений нормального режима работы системы электрического транспорта (ТП – ТС – ЭПС) на ГДП необходимо принимать меры по ликвидации опасных последствий этих нарушений. Эти функции выполняет защита соответствующего элемента тяговой сети горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: электроснабжение, тяговая сеть, короткое замыкание, защита, надежность функционирования, уставки, мониторинг, удаленный доступ.

Для цитирования: Кузнецов С. М., Андрияшин С. Н. Повышение надежности функционирования защит тяговой сети карьерного железнодорожного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12–2. – С. 143–156. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_143.

Increasing the reliability of traction network protection by means of monitoring

S. M. Kuznetsov¹, S. N. Andriyashin¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The problem of reliable functioning of the protections of feeders of the DC traction network has arisen since the beginning of the development of electric transport, the growth of the power of electric rolling stock and the speed of movement. To solve it, developed countries have proposed hundreds of devices aimed at improving the reliability of functioning, but the task has not been completely solved to date, and many proposals (patents) they remained unsold, including at traction substations of mining enterprises and electric rolling stock of quarry railway transport. The reason is that all types of protections reacted to one parameter: current, voltage, resistance, heating of current-carrying parts and others. The creation of digital devices made it possible to create sets of protections that respond to several signs of a transient process in the traction network, and their joint occurrence can characterize an emergency mode and issue a command to disconnect the line (feeder). The authors have determined, in some modes, the values of short-circuit (SC) currents and especially the rate of change of current (di/dt) have been clarified in monitoring, which can be used as a sign of short circuit in combination with other factors in digital protections. It is established that in case of breakdown of insulation or power semiconductor devices in converters of traction substations, the SC current depends on the parameters of the external power supply circuit and the converter unit and can reach 20...80 kA. The experience of operating the sets as part of the classical current-pulse protection (MIZ) and multi-channel digital terminal (Inter) revealed difficulties in choosing the types of digital terminal protections, determining their coverage area and settings, as well as coordination with the MIZ. Small currents of remote short circuits also pose a danger to electrical equipment, since in the vast majority of cases an electric arc occurs at the short circuit site, the voltage drop in which is 200... 500 V, a large amount of heat is released at the short circuit site. As a result of the research conducted for the West Siberian Railway, an algorithm was proposed for setting the protection settings of the terminal and the MIZ, determining their zones of action based on mathematical modeling and using monitoring of the traction network operating modes, which significantly increased the reliability of the protection kit. Thus, in case of any types of violations of the normal operation of the electric transport system at the mining enterprises, it is necessary to take measures to eliminate the dangerous consequences of these violations. These functions are performed by the protection of the corresponding element of the traction network of mining enterprises.

Key words: power supply, traction network, short-circuit current, substation, protection, operational reliability, methodology, settings, monitoring, remote access.

For citation: Kuznetsov S. M., Andriyashin S. N. Increasing the reliability of traction network protection by means of monitoring. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):143–156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_143.

1. Введение

Тяговые сети (ТС) горнодобывающих предприятий (ГДП), аналогично

ТС железнодорожного и городского электрического транспорта, в настоящее время оборудованы устройствами

защиты (УЗ), которые работают в следящем режиме и срабатывают, когда возникает аварийная ситуация. В соответствии с Правилами Устройства Электроустановок (ПУЭ) для повышения надежности к характеристикам защиты предъявляют ряд общих требований, позволяющих нивелировать воздействия аварийных режимов работы на систему электроснабжения ГДП — это селективность, чувствительность, быстродействие и надежность функционирования [6,7].

Селективность — это свойство любого типа защиты или комплекта защит отключать только поврежденный участок ТС, электроподвижной состав (ЭПС) или любой объект тяговой подстанции (ТП) только в аварийном режиме и не срабатывать от нагрузок и допустимых перегрузок.

Чувствительность защиты позволяет отличать аварийные режимы от нормальных и отключать поврежденный участок ТС в любой части фидерной зоны с коэффициентом чувствительности не ниже $K_{\text{ч}} = 1,25$.

Следовательно, выполнение требований ПУЭ в части эффективности функционирования обеспечивается выбором типов защит ТС и настройкой уставок, кроме того, на фидере контактной сети (ФКС) должно быть установлено не менее трех защит [8].

Со стороны переменного тока совмещенной подстанции ГДП требования ПУЭ, как правило, выполняются, и особенно эффективно при использовании комплектов цифровых защит, например типа БМРЗ-100 отечественного производства. Для тягового блока совмещенной подстанции ГДП можно использовать цифровые терминалы серии Intel, которые в силу специфики нагрузок настраивают на уставку, рассчитанную аналитически [9,10] с возможностью корректировки по опыту эксплуатации.

Статистический анализ срабатывания защиты (ФКС) на тяговых подстанциях проводился с целью получения закономерностей функционирования аналоговой МИЗ, а совместное использование МИЗ и цифровой защиты (ЦЗАФ) представляет собой полный комплект защиты. В анализе каждое срабатывание защиты (истинное и ложное) представлено как случайная величина, при этом сведения о срабатываниях защит, как классических МИЗ, так и полного комплекта, получены на опытном участке за два года. Установлено, что относительное количество правильных срабатываний классической МИЗ за год составило около 7%, а ложных срабатываний около 93%, что подтверждает мнение многих авторов о низком уровне функционирования. Несколько ниже (на 15–20%) ложные срабатывания на ФКС с полным комплектом защит, при этом выяснилась проблема с настройкой уставок цифровой части комплекта (на этапе внедрения) и была поставлена задача поиска пути устранения этой проблемы на примере ТС железных дорог [11], аналогично и в тяговых сетях ГДП.

Цель исследования состоит в совершенствовании методики расчета уставок комплекта защит тяговой сети ГДП и автоматизации контроля их функционирования с возможностью адаптации к конкретным параметрам каждого фидера контактной сети (ФКС) на основе математического моделирования переходных процессов в ТС ГДП, использования мониторинга для корректировки уставок [12–14]. Для совершенствования методики расчета уставок комплекта защит тяговой сети ГДП предложено дополнительно к аналитическому расчету использовать математическое моделирование с последующим уточнением уставок защит мониторингом в режиме реаль-

ного времени, которое определяется для каждого участка. Значения уставок в аналитическом расчете формул (4) – (8) определяется приблизительно среднее значение скорости нарастания и приращения тока.

2. Методика исследований

Отключение тяговой сети горнодобывающих предприятий выключателем обеспечивается надежностью коммутирующего аппарата — быстродействующего выключателя (БВ), особенно при КЗ вблизи подстанции, типом защит и зоной их действия, определяемых уставкой.

Инструкцией по расчету уставок ФКС департамента электроснабжения РАО РЖД выбор типа защит и расчет уставок рекомендовано для каждого вида защиты применять группу ее назначения: основную, резервную и дополнительную. Основной защитой считают максимально-импульсную (МИЗ), реализованную в ТС ГДП с помощью дифференциального реле типа РДШ либо на выключателях серии АБ-2/4 с встроенным в цепь тока индуктивным шунтом. В качестве дополнительной и резервной рекомендовано использовать защиты цифрового терминала.

Исследование надежности функционирования защит ФКС горнодобывающих предприятий (основной, резервной и дополнительной) в традиционном или цифровом исполнении выполним на основе Инструкции РАО РЖД для типовой схемы питания участка ТС, при этом рассмотрим два варианта:

1) защита ФКС традиционной МИЗ на дифференциальном реле РДШ или реле максимального тока РМТ;

2) защита с помощью терминала In-Ter-3,3 (то же ЦЗАФ-3,3), кВ, и МИЗ (полный комплект защит).

Уставки токовых защит при расчете аналитическим методом выбирают по следующему условию:

$$K_3 I_{н.макс} / K_6 \leq I_{у.МТЗ} \leq I_{к.мин} / K_4. \quad (1)$$

Здесь K_3 , K_6 , K_4 — соответственно коэффициенты запаса, возврата реле и чувствительности.

Для максимальной импульсной защиты ток уставки для режима максимальной нагрузки $I_{н.макс}$ с коэффициентом запаса $K_3 = 1$ определим как:

$$I_{у.МИЗ} = K_3 I_{н.макс}. \quad (2)$$

Уставку МИЗ, рассчитанную по рекомендуемому аналитическому методу, проверим по наименьшему значению $I_{к.мин}$ при коротком замыкании в конце зоны действия защиты:

$$I_{у.МИЗ} = K_{y3} I_{к.мин}, \quad (3)$$

где K_{y3} — коэффициент дифференциального реле РДШ или БВ при приращениях тока в переходном режиме, равный 1,05; $I_{к.мин}$ — минимальный ток КЗ, А, который можно рассчитать или получить в эксперименте.

$$I_{у} = \frac{K_3}{K_B} I_{н.макс}, \quad (4)$$

где K_B — коэффициент выдержки времени резервной защиты.

Чувствительность защиты к КЗ в конце защищаемой зоны проверяем как отношение тока КЗ к току уставки. Коэффициент чувствительности K_4 должен быть не менее 1,25; в этом случае будет обеспечена устойчивость функционирования защиты.

Уставку защиты по сопротивлению (ДЗ) в терминале In-Ter-3,3кВ выбираем приблизительно по сопротивлению в конце фидерной зоны с коэффициентом чувствительности равным 1,25, если ДЗ основная, или 1,15, если ДЗ — резервная.

Значение скорости нарастания тока $(di/dt)_y$ должно удовлетворять следующему соотношению:

$$K_3 (di/dt)_{i.макс} \leq (di/dt)_y \leq 1/K_4 (di/dt)_{к.мин}, \quad (5)$$

где $(di/dt)_{н\ max}$ — наибольшее значение скорости нарастания тока при нормальном режиме, А/мс; $(di/dt)_{к\ min}$ — наименьшее значение скорости нарастания тока при коротком замыкании, А/мс. При этом коэффициент запаса K_3 принимаем равным 1,1–1,3, коэффициент чувствительности $K_4 = 1,15$. В инструкции и исследованиях [11] приведены лишь пределы изменения di/dt , коэффициенты в (5) имеют широкий диапазон, поэтому расчетную скорость нарастания тока для нормального режима приближенно определим как

$$(di/dt)_{i\ max} = \frac{\Delta I_{н\ max}}{t_T}, \quad (6)$$

где $\Delta I_{н\ max}$ — приращение тока при пуске поезда максимального веса или переходе его на другой фидер тяговой сети, А; t_T — постоянная времени нарастания тока, мс, которую принимаем по [11, 12]. Таким образом, выбор уставки аналитическим методом носит итерационный характер и может быть приближен к оптимальному с минимумом ложных срабатываний путем мониторинга осциллограмм цифрового терминала.

Скорость нарастания тока для режима короткого замыкания в тяговой сети ГДП можно определить по выражению

$$(di/dt)_{к\ min} = \frac{U_{pac}}{L_{cy} + L_{по} + L_{тс}}, \quad (8)$$

где U_{pac} — напряжение на шинах выпрямленного тока ТП, В; L_{cy} — индуктивность цепи обратного тока, мГн; $L_{по}$ — индуктивность обратного токопровода, мГн; $L_{тс}$ — индуктивность КС, мГн.

Таким образом, расчет уставок защит, по методике РАО РЖД приближенный, допускает некоторое количество ложных срабатываний, поэтому не обеспечивает надежное функционирование защиты [15,16].

3. Результаты

Для обеспечения нормального функционирования защит тяговой сети ГДП их уставки, рассчитанные аналитическим методом РАО РЖД, предлагается уточнять с помощью имитационного моделирования переходных процессов в ТС [17–20]. При этом обеспеченность защитой участка тяговой сети авторами рекомендуется проверять на отсутствие «мертвых» зон защиты либо в крайнем случае при их минимальной длине. Наглядно это представляется в виде схемы для участка с тремя ТП (рис. 1, а) и диаграммы зон действия защит (рис. 1, б), из которой следует, что классическая МИЗ не обеспечивает защиту всего участка ТС, поэтому имеем мертвые зоны незначительной длины l_{M1} и l_{M2} (см. рис. 1, б). Цифровые защиты терминала могут перекрывать всю защищаемую зону или иметь мертвые зоны незначительной длины. Повысить обеспеченность защитой ТС ГДП можно, откорректировав уставки защит с использованием мониторинга [21,22].

Цифровые терминалы позволяют осуществлять мониторинг тяговой сети непрерывно, распознавание переходного процесса происходит до достижения током максимальных значений, что позволяет анализировать токи перегрузки, их приращения и скорости нарастания, превышающие уставки и приводящие к ложным срабатываниям защит. Функционально это обеспечивается дискретным (скважность 2 мс) измерением тока и напряжения ТС, фиксацией в памяти параметров предаварийных процессов (низкая уставка для начала записи переходного процесса или медленный след) и отключением произошедших аварийных процессов (превышение током заданных уставок или быстрый след). Анализ осциллограмм монитора позволяет накапливать статистику, анализи-

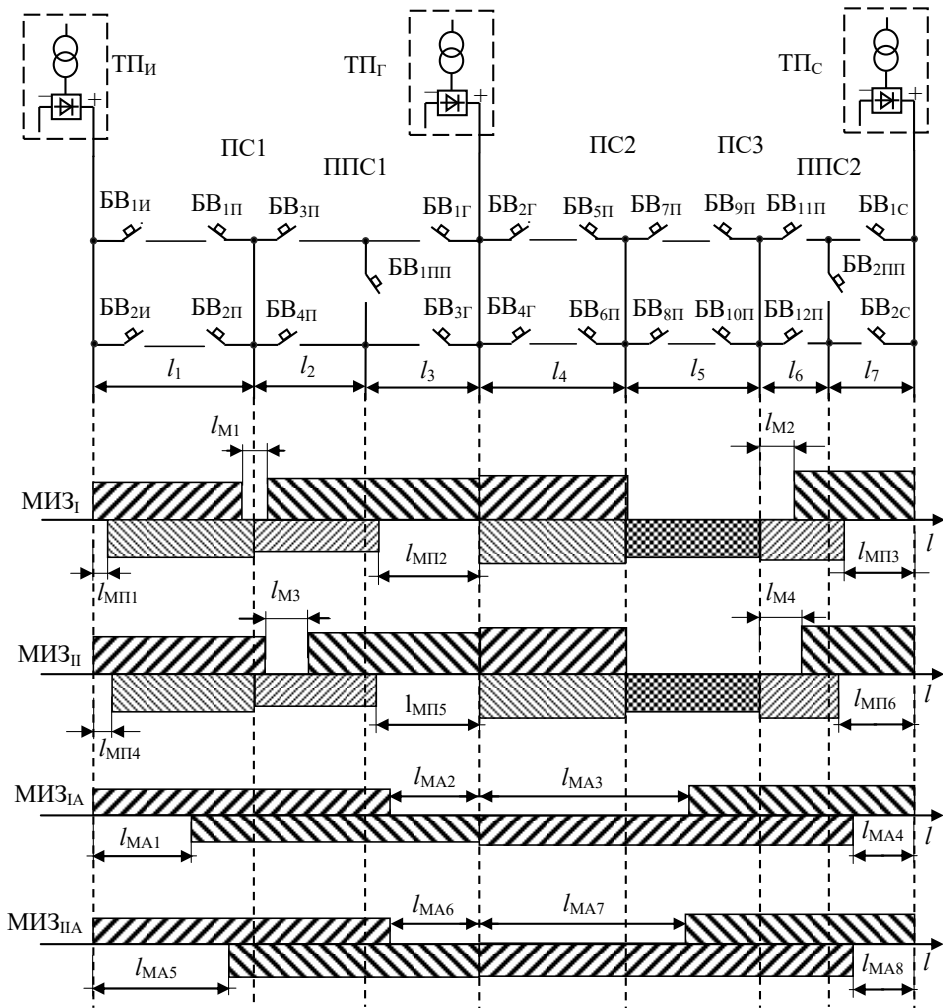


Рис. 1. Расчетная схема: а – зоны действия МИЗ от токов короткого замыкания, б – для ТП: $l_{МП1} \dots l_{МП3}$ – длины «мертвых» зон комплектов защит для нормальных режимов; $l_{МПА1} \dots l_{МПА6}$ – длины «мертвых» зон комплектов защит для вынужденных режимов

Fig. 1. Design diagram: а – the zones of action of the MIZ against short-circuit currents, б – for transformer substations: $l_{MP1} \dots l_{MP3}$ – the length of the “dead” zones of the protection kits for normal modes; $l_{MPA1} \dots l_{MPA6}$ – lengths of “dead” zones of protection kits for forced modes

ровать ее и при необходимости корректировать режимную карту уставок.

Дифференциальное реле МИЗ в полном комплекте защит можно настраивать по условию (2), а в терминале In-ter МТЗ настраивают по среднему значению тока за 1 мс за последние n интервалов с шагом 125 мс:

$$I_{уст} \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{ti}, \quad (9)$$

где $I_{уст}$ – ток уставки, А; n – число отсчетов, равное восьми; I_{ti} – текущие односекундные значения тока фидера, А. Рекомендуется при определении тока уставки МТЗ терминала

выполнить мониторинг нагрузки каждого фидера тяговой сети ГДП, определить ток, не вызывающий срабатывания защиты, проверить выполнение условия (1) с учетом коэффициента запаса. Период в 125 мс рекомендован заводом-изготовителем в результате статистических исследований. За это время заканчивается переходный процесс. Выполнение (1) исключает ложные срабатывания, но не на всех участках ТС, поэтому нужны, по требованиям ПУЭ, другие виды защит (всего не менее трех).

Защиту по сопротивлению ТС, или направленную дистанционную защиту (ДЗ), а также защиту по приращению тока (ЗПТ) можно настроить только приближенно по опыту эксплуатации или определить параметры с помощью математического моделирования, уставку следует корректировать по результатам мониторинга в течение пяти суток.

Непрерывное наблюдение за процессами в тяговой сети всех терминалов электроснабжения ЭТ ГДП, по предложению авторов [21,22], может быть обеспечено организацией удаленного доступа. Для этого разработаны схемы постоянного наблюдения за исследуемым объектом (схема удаленного доступа) и подключены к цифровому терминалу диспетчера все терминалы участка [20,21]. Принцип работы системы удаленного доступа: по схеме удаленного доступа все терминалы тяговой подстанции выведены на общий компьютер подстанции, который подключен к локальной сети РЖД, информация передается по локальной сети энергодиспетчеру и в технический отдел дистанции электроснабжения для обработки и принятия решений.

4. Обсуждение результатов

Информацию о работе защит ТС ГДП, полученную в мониторинге

за определенный отрезок времени, анализируют, выявляют аварийные ситуации на ФКС и исследуют причины их возникновения. Анализ осциллограмм позволяет корректировать уставки. В комплексе обработанная информация позволяет повысить надежность функционирования защиты.

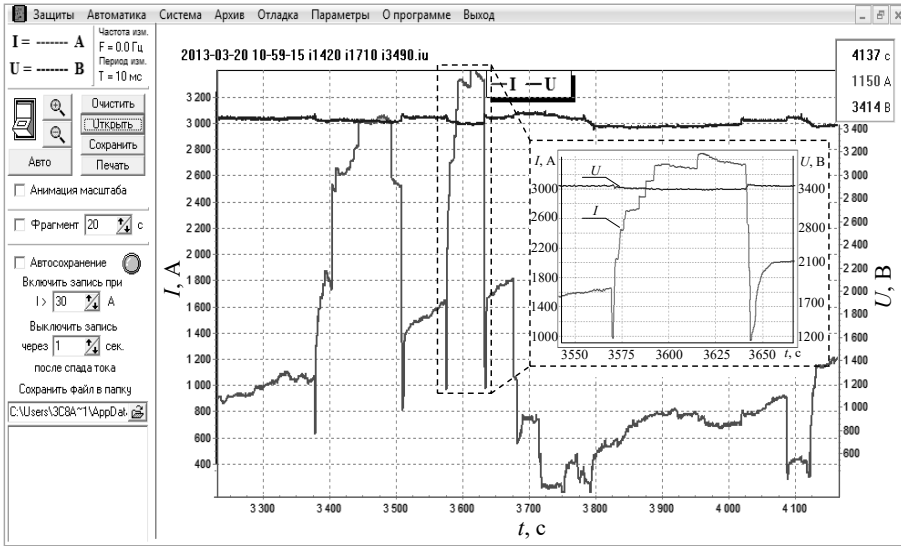
В качестве примера на рис. 2 приведена осциллограмма нормального режима работы ТС — пуск поезда, и нештатный режим — короткое замыкание в ТС. Пунктиром на выноске (рис. 2, а) показана возможность программы анализа осциллограмм увеличивать/уменьшать масштаб для детального анализа (например, определение приращения тока ΔI , времени нарастания t и скорости di/dt).

По осциллограммам можно выполнить анализ нагрузок в ТС ГДП при нормальном режиме работы межподстанционной зоны (рис. 3).

Пики до 3200 А на рис. 3 соответствуют пуску поезда с остановок, а далее он движется по элементам разного профиля пути ГДП, например из разреза в отвал или выводка на магистральные пути. Запись мгновенных значений можно проводить в течение нескольких суток в часы интенсивного графика движения, с фиксацией параметров поездов, следующих по участку (марка, масса). Это позволяет выявить максимальные значения тока ФКС и при наличии ложных отключений откорректировать уставки защит. Кроме того, с помощью осциллограмм мониторинга можно просмотреть все режимы в реальном времени и оценить пропускную способность исследуемого участка ТС ГДП.

Наиболее неблагоприятный режим работы ФКС возникает при проходе ЭПС секционного изолятора (СИ). На рис. 4 совмещены осциллограммы токов двух фидеров ТП в процессе

а



б

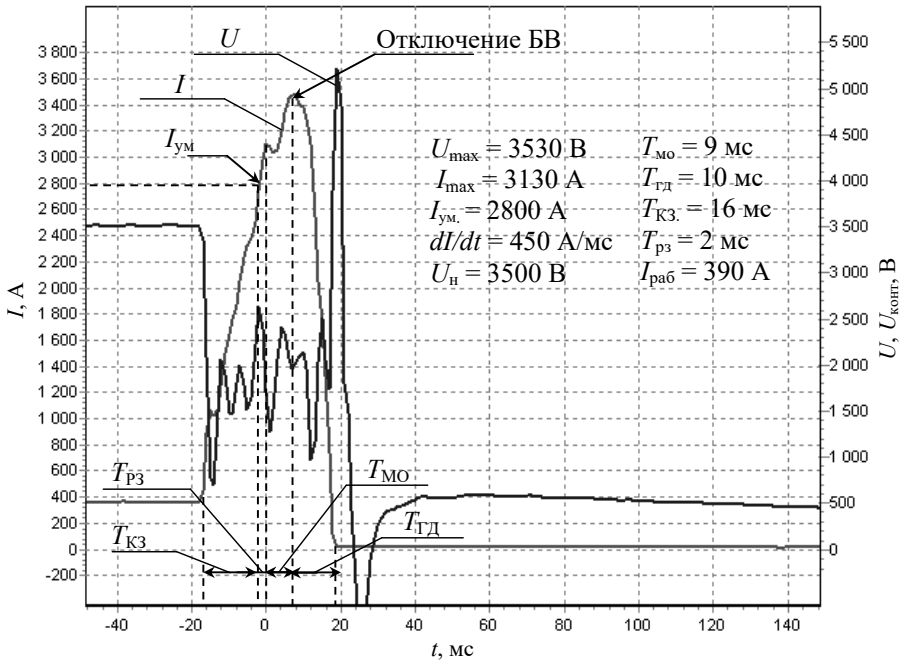


Рис. 2. Осциллограмма мгновенных значений токов и напряжений в ТС: а – в нормальном режиме, б – при КЗ: $I_{ум}$ – уставка максимальной токовой защиты, А; $T_{КЗ}$ – время короткого замыкания в тяговой сети, мс; $T_{рз}$ – время работы защиты, мс; $T_{мо}$ – время механического отключения БВ, мс; $T_{гд}$ – время гашения дуги в БВ, мс

Fig. 2. Oscillogram of instantaneous values of currents and voltages in the traction network: а – in normal mode, б – at short circuit: $I_{ум}$ – setting of maximum current protection, A; $T_{КЗ}$ – short circuit time in the traction network, ms; $T_{рз}$ – protection operation time, ms; $T_{мо}$ is the time of mechanical shutdown of the BV, ms; $T_{гд}$ – arc extinguishing time in BV, ms

перехода поезда с фидера Ф2 на фидер Ф4, ЭПС подходит к СИ с током I_1 , нагрузка на фидере Ф4 незначительна и равна I_2 , перед замыканием СИ машинист сбросил ток до нуля, а затем выполнил повторный пуск до тока I_3 . Если бы поезд продолжал движение под током I_1 , близким к уставке выключателя, и при толчке тока I_2 произошло бы ложное срабатывание защиты. Осциллограмму тока за время перехода СИ у ТП можно анализировать, растянув осциллограмму от t_1 до t_4 (см. рис. 2, а) и анализировать качество регулировки СИ.

Режим ведения поезда не предполагает прохождение СИ без тока, в данном случае это подстраховка машиниста, при которой было затрачено дополнительно 23,3 кВтч электроэнергии — это нестандартная ситуация.

Анализ осциллограмм мониторинга ТС ГДП позволяет определить параметры всех признаков переходного процесса при КЗ (см. рис. 2–4), накопить и обработать их, а затем использовать для корректировки уставок.

5. Заключение

Поскольку объектом исследования авторов является тяговая сеть железнодорожного транспорта горнопромышленных комплексов (карьеров, разрезов, обогатительных предприятий), которая, обладая определенными особенностями в части проектирования и эксплуатации силовых трансформаторов, во многом идентична объектам тяговых сетей железнодорожного транспорта предприятий, методика совершенствования защиты тяговой сети горнодобывающих предприятий базируется на МИЗ и комплектах защит ФКС, реализованных в настоящее время в РАО РЖД.

Статистические исследования срабатывания защиты цифровых терминалов в случае установки их в тяговой сети ГДП позволяют определить граничные средние значения скорости нарастания тока в тяговой сети, что дает возможность использовать их при выборе уставок защит и зон их действия тяговой сети горнодобывающих предприятий.

Математическое моделирование позволяет исследовать изменения тока

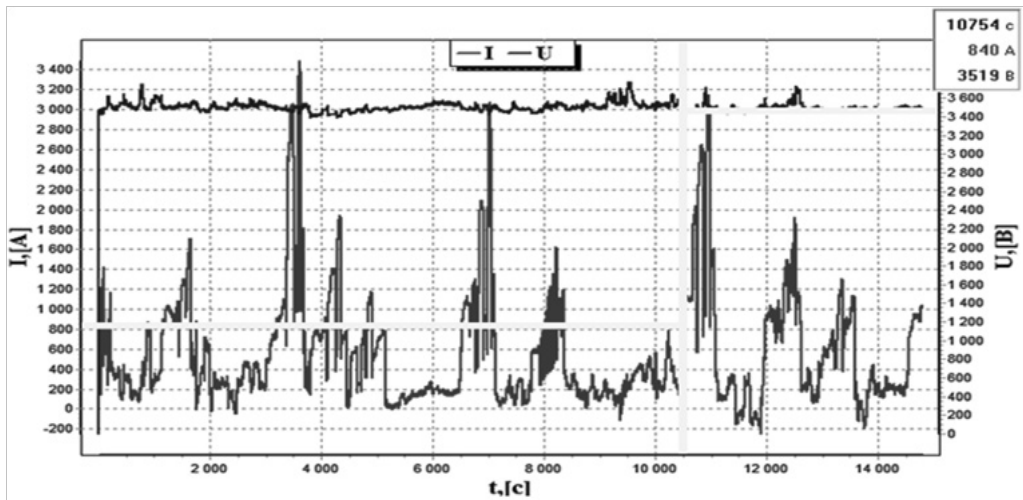


Рис. 3. Режим потребления тока поездом на ФКС опытного участка

Fig. 3. Current consumption mode by train on the feeder of the contact network of the experimental section

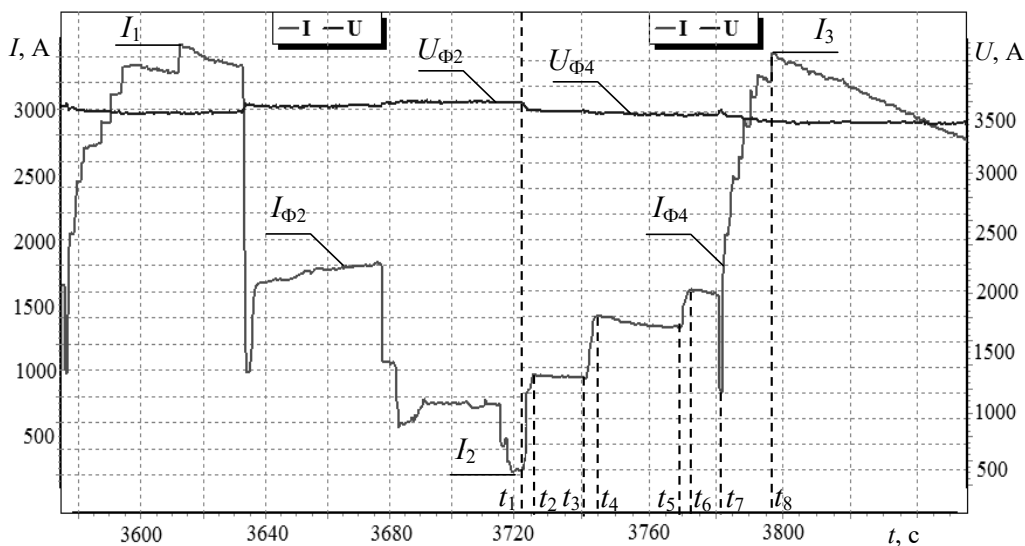


Рис. 4. Осциллограммы перехода СИ электровозом ВЛ-10 К вблизи ТП: $I_{\Phi 2}$, $U_{\Phi 2}$ — ток и напряжение на фидере 2; $I_{\Phi 4}$, $U_{\Phi 4}$ — то же на фидере 4, I_1 и I_3 — максимальные значения тока рассматриваемого поезда, I_2 — минимальное значение тока поезда на другом фидере

Fig. 4. Waveforms of the transition of a sectional insulator by an electric locomotive VL-10 K near a traction substation: I_{F2} , U_{F2} — current and voltage on feeder 2; I_{F4} , U_{F4} — the same on feeder 4, I_1 and I_3 — the maximum current values of the train in question, I_2 — the minimum current value of the train on another feeder

и напряжения в переходных режимах работы ТС, определить признаки и их параметры, например, пределы изменения скорости нарастания тока di/dt , приращение тока ΔI , время переходного процесса t , и использовать их в дальнейшем при выборе и корректировках уставок защит в связи с изменением параметров ЭПС и размеров перевозок в пределах ГДП.

С помощью мониторинга в процессе эксплуатации цифровых терминалов можно по осциллограммам токов и напряжений нормальных и аварийных режимов анализировать случаи ложных срабатываний защиты и, корректируя уставки защит ФКС, повысить надежность их функционирования.

Основанный на совместном использовании математического моделирования и мониторинга алгоритм

настройки уставок защит ФКС апробирован и рекомендуется к внедрению в ТС ГДП как для существующих аналоговых защит (МИЗ), так и для комплектов цифровых защит (ЦЗАФ) при их внедрении. Диаграммы зон действия защит позволяют судить об обеспеченности защитой индивидуально каждой фидерной зоны. Мониторинг с удаленным доступом к цифровым устройствам позволяет контролировать качество настройки и при необходимости оперативно корректировать уставку каждой защиты цифрового терминала. В отдельных случаях, когда МИЗ или цифровая защита не могут обеспечить все требования Правил устройства электроустановок, рекомендуется использовать телеблокировку и испытание изоляции перед повторным включением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малафеев С. И., Малафеев С. С. К анализу энергетических процессов в питающей сети при работе карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3. — С. 126–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-126-137.
2. Абрамов Б. И., Иванов А. Г., Шиленков В. А., Кузьмин И. К., Шевырев Ю. В. Электропривод современных шахтных подъемных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5–2. — С. 145–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.
3. Murzintsev A., Korolev A., Zhgun K., Baembitov R. Short-circuit Current Reduction in Auxiliary Network of Traction Substations // Transportation Research Procedia. 2021, vol. 54, pp. 346–354, DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.082.
4. Boige F., Richardeau F., Lefebvre S., Cousineau M. SiC power MOSFET in short-circuit operation: Electro-thermal macro-modelling combining physical and numerical approaches with circuit-type implementation // Mathematics and Computers in Simulation. 2019, vol. 158, pp. 375–386, DOI: 10.1016/j.matcom.2018.09.020.
5. Yang X., Gu J., Zheng T. Q., Zhao Z. Faults and reliability analysis of negative resistance converter traction power system // Microelectronics Reliability. 2020, vol. 114. DOI: 10.1016/j.microrel.2020.113911.
6. Farhadi M., Mohammed O. A. Protection of multi-terminal and distributed DC systems: Design challenges and techniques // Electric Power Systems Research. 2017, vol. 143, pp. 715–727. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.10.038.
7. Huo Q., Xiong J., Zhang N., Guo X., Wu L., Wei T. Review of DC circuit breaker application // Electric Power Systems Research. 2022, vol. 209. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107946.
8. Kuznetsov S. M., Orlova I. V., Lisichko O. I. Theory and a posteriori practical methods for calculating the reliability of electrical equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. — Vol. 560(1), 012135. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012135.
9. Kuznetsov S. M., Myatezh A. V., Rozhkova M. V., Tenkovskaya S. A., Akifeva E. V., Ivanov A. V. Service system and monitoring of information terminals for protection of railway lines of long-distance trains // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1333, iss. 4, art. 042023, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042023.
10. Бадер М. П., Гречишников В. А., Шевлюгин М. В., Король Ю. Н. Анализ показателей работы силового оборудования системы тягового электроснабжения ОАО «РЖД» на основе мониторинга показателей АСКУЭ тяговых подстанций в режиме реального времени // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2011. — № 5–6. — С. 5–8.
11. Демиденко И. С., Ярославцев М. В., Кривова А. О. Математическое моделирование переходных процессов в тяговой сети // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Шестнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3-х т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ. — 2010, 207 с.
12. Аржанников Б. А., Бадер М. П., Бурков А. Т., Котельников А. В., Набойченко И. О. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электрооборудования постоянного тока // Электротехника. — 2016. — № 9. — С. 51–57.
13. Xia M., Zhou Y., Huang Y., Yang H., Tai Y. Research on Short-Circuit Characteristics of Subway DC Traction Power Supply System // IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2020, pp. 3456–3460. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254651.
14. Radu P. V., Lewandowski M., Szelag A., Steczek M. Short-Circuit Fault Current Modeling of a DC Light Rail System with a Wayside Energy Storage Device // Energies. 2022, vol. 15. DOI: 10.3390/en15103527.

15. Teymourfar R., Fard R. N., Asaei B., Iman-Eini H. Energy recovery in a metro network using stationary supercapacitors // 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference. 2011, pp. 324–329. DOI: 10.1109/PEDSTC.2011.5742440.

16. Жарков Ю. И., Физурнов Е. П. Проблемы организации защиты тяговой сети постоянного тока от коротких замыканий при повышенных тяговых нагрузках // Электрификация транспорта. — 2014. — № 7. — С. 28–31.

17. Yu L., He J. H., Hu J., Bo Z. Q., Li M. X., Yip T., Klimek A. Accurate track modeling for fault current on DC railways based on MATLAB/Simulink // Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. 2010, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PES.2010.5590135.

18. Du F., He J. H., Yu L., Li M. X., Bo Z. Q., Klimek A. Modeling and Simulation of Metro DC Traction System with Different Motor Driven Trains // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), IEEE 2010 Asia-Pacific. 2010, pp. 1–4. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448372.

19. Sun L., Wu M., Sun J., Yang S. Simulation of Short-Circuit Fault Occurring on Subway Train // Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT). 2018, pp. 585–595. DOI: 10.1007/978-981-10-7986-3_60.

20. Arboleya P., Mayet C., Mohamed B., Aguado J. A., Torre S. A review of railway feeding infrastructures: Mathematical models for planning and operation // eTransportation. 2020, vol. 5. DOI: 10.1016/j.etrans.2020.100063.

21. Демиденко И. С. Повышение эффективности защиты тяговой сети постоянного тока: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. — М.: Новосибирский государственный технический университет, 2013. — 19 с.

22. Shilong C., Zihang Z., Hao L., Guihong B., Chao X., Pengsong L., Wenyong Z. Traction Network Protection Based on Similarity of Transient Current Waveform // Frontiers in Energy Research. 2022, vol. 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.865602. **MIAB**

REFERENCES

1. Malafeev S. I., Malafeev S. S. K analizu energeticheskikh processov v pitayushchej seti pri rabote kar'ernogo ekskavatora. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3, pp. 126–137. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-126-137.

2. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuz'min I. K., Shevyrev YU. V. Elektroprivod sovremennyh shahtnyh pod'yomnyh mashin. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5–2, pp. 145–162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

3. Murzintsev A., Korolev A., Zhgun K., Baembitov R. Short-circuit Current Reduction in Auxiliary Network of Traction Substations. *Transportation Research Procedia.* 2021, vol. 54, pp. 346–354, DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.082.

4. Boige F., Richardeau F., Lefebvre S., Cousineau M. SiC power MOSFET in short-circuit operation: Electro-thermal macro-modelling combining physical and numerical approaches with circuit-type implementation. *Mathematics and Computers in Simulation.* 2019, vol. 158, pp. 375–386. DOI: 10.1016/j.matcom.2018.09.020.

5. Yang X., Gu J., Zheng T. Q., Zhao Z. Faults and reliability analysis of negative resistance converter traction power system. *Microelectronics Reliability.* 2020, vol. 114. DOI: 10.1016/j.microrel.2020.113911.

6. Farhadi M., Mohammed O. A. Protection of multi-terminal and distributed DC systems: Design challenges and techniques *Electric Power Systems Research.* 2017, vol. 143, pp. 715–727. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.10.038.

7. Huo Q., Xiong J., Zhang N., Guo X., Wu L., Wei T. Review of DC circuit breaker application. *Electric Power Systems Research.* 2022, vol. 209. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107946.

8. Kuznetsov S. M., Orlova I. V., Lisichko O. I. Theory and a posteriori practical methods for calculating the reliability of electrical equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 560. DOI:10.1088/1757-899X/560/1/012135.
9. Kuznetsov S. M., Myatezh A. V., Rozhkova M. V., Tenkovskaya S. A., Akifeva E. V., Ivanov A. V. Service system and monitoring of information terminals for protection of railway lines of long-distance trains. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1333, iss. 4, art. 042023, 6 p. DOI:10.1088/1742-6596/1333/4/042023.
10. Badyor M. P., Grechishnikov V. A., Shevlyugin M. V., Korol' YU. N. Performance analysis of power equipment of power supply system of traction JSC "Russian Railways", based on monitoring of traction substations in real-time. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. 2011, no. 5-6, pp. 5-8. [In Russ].
11. Demidenko I. S., Yaroslavcev M. V., Krivova A. O. Mathematical modeling of transient processes in the traction network. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: SHestnadcataya Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov i aspirantov: Tez. dokl. V 3-h t. T.2*, Moscow, Izdatel'skiy dom MEI. 2010, 207 p. [In Russ].
12. Arzhannikov B. A., Bader M. P., Burkov A. T., Kotel'nikov A. V., Nabojchenko I. O. Improving the basic requirements for the system and devices of DC traction power supply. *Russian Electrical Engineering*. 2016, no. 9, pp. 51-57. [In Russ].
13. Xia M., Zhou Y., Huang Y., Yang H., Tai Y. Research on Short-Circuit Characteristics of Subway DC Traction Power Supply System. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2020, pp. 3456-3460. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254651.
14. Radu P. V., Lewandowski M., Szlag A., Steczek M. Short-Circuit Fault Current Modeling of a DC Light Rail System with a Wayside Energy Storage Device. *Energies*. 2022, vol. 15. DOI: 10.3390/en15103527.
15. Teymourfar R., Fard R. N., Asaei B., Iman-Eini H. Energy recovery in a metro network using stationary supercapacitors. 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference. 2011, pp. 324-329. DOI: 10.1109/PEDSTC.2011.5742440.
16. Zharkov Yu. I., Figurnov E. P. The problems of organization the protection of the DC traction network from the short-circuit faults at the high current loads. *Elektrifikaciya transporta*. 2014, no. 7, pp. 28-31. [In Russ].
17. Yu L., He J. H., Hu J., Bo Z. Q., Li M. X., Yip T., Klimek A. Accurate track modeling for fault current on DC railways based on MATLAB/Simulink. *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*. 2010, pp.1-6. DOI: 10.1109/PES.2010.5590135.
18. Du F., He J. H., Yu L., Li M. X., Bo Z. Q., Klimek A. Modeling and Simulation of Metro DC Traction System with Different Motor Driven Trains. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), IEEE 2010 Asia-Pacific*. 2010, pp. 1-4. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5448372.
19. Sun L., Wu M., Sun J., Yang S. Simulation of Short-Circuit Fault Occurring on Subway Train. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT)*. 2018, pp. 585-595. DOI: 10.1007/978-981-10-7986-3_60.
20. Arbolea P., Mayet C., Mohamed B., Aguado J. A., Torre S. A review of railway feeding infrastructures: Mathematical models for planning and operation. *eTransportation*. 2020, vol. 5. DOI: 10.1016/j.etrans.2020.100063.
21. Demidenko I. S. Povyshenie effektivnosti zashchity tyagovoj seti postoyannogo toka [The Improving of the Efficiency of DC Traction Network Protection] Автореф. PhD's thesis, Novosibirsk, NSTU, 2013. — 19 p. [In Russ].
22. Shilong C., Zihang Z., Hao L., Guihong B., Chao X., Pengsong L., Wenying Z. Traction Network Protection Based on Similarity of Transient Current Waveform. *Frontiers in Energy Research*. 2022, vol. 10. DOI: 10.3389/fenrg.2022.865602.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Сергей Михайлович Кузнецов*¹ — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: ksmetk@mail.ru;

*Сергей Николаевич Андрияшин*¹ — ассистент,
e-mail: andriyashin.2014@corp.nstu.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1575-8933;

¹ Новосибирский государственный технический университет.

Для контактов: *Андрияшин С. Н.*, e-mail: andriyashin.2014@corp.nstu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kuznetsov S. M.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: ksmetk@mail.ru;

*Andriyashin S. N.*¹, assistant,
e-mail: andriyashin.2014@corp.nstu.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1575-8933;

¹ Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia.

Corresponding author: *Andriyashin S. N.*, e-mail: andriyashin.2014@corp.nstu.ru.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

