

УДК 621.316.5

EDN IJNNAC

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ДЛЯ РУДНИЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ 3,3 кВ

А.И. Белошистов

ORCID: 0009-0005-7057-2965 e-mail: beloshalex@yandex.ru

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования
Донецк, Россия

А.Л. Серов

ORCID: 0009-0007-9931-7559 e-mail: jusstus@yandex.ru

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования
Донецк, Россия

А.А. Белошистов

ORCID: 0009-0008-6034-168X e-mail: alex1950@ro.ru

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический
институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования
Донецк, Россия

Рассматривается разработка микропроцессорной системы максимальной токовой защиты для рудничного оборудования напряжением 3,3 кВ, включающей высоковольтные датчики тока и блок токовой защиты. Основное внимание уделено решению ключевых проблем защиты шахтных электросетей: обеспечению быстродействия срабатывания, точности измерения тока и устойчивости к переходным процессам. Экспериментальные исследования демонстрируют стабильную работу системы при различных режимах нагрузки и переходных процессах, характерных для шахтных условий эксплуатации. Разработка направлена на импортозамещение и повышение взрывобезопасности высокопроизводительных угольных шахт за счет создания современного отечественного оборудования.

Ключевые слова: взрывозащита, датчики тока, контроль изоляции, микропроцессорная защита, рудничное оборудование.

Для цитирования: Белошистов А.И., Серов А.Л., Белошистов А.А. Микропроцессорная максимальная токовая защита для рудничного оборудования напряжением 3,3 кВ // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 4. С. 32-54. EDN IJNNAC

MICROPROCESSOR-BASED OVERCURRENT PROTECTION SYSTEM FOR 3.3 kV MINING ELECTRICAL EQUIPMENT

A.I. Beloshistov

ORCID: 0009-0005-7057-2965 e-mail: beloshalex@yandex.ru
Scientific-research, project-designing and technological institute
of explosion proof and mine electrical equipment
Donetsk, Russia

A.L. Serov

ORCID: 0009-0007-9931-7559 e-mail: jusstus@yandex.ru
Scientific-research, project-designing and technological institute
of explosion proof and mine electrical equipment
Donetsk, Russia

A.A. Beloshistov

ORCID: 0009-0008-6034-168X e-mail: alex1950@ro.ru
Scientific-research, project-designing and technological institute
of explosion proof and mine electrical equipment
Donetsk, Russia

Abstract. The article discusses the development of a microprocessor system of maximum current protection for mine equipment with a voltage of 3.3 kV, including high-voltage current sensors and a current protection unit. The main focus is on solving the key problems of protecting mine power grids: ensuring response speed, current measurement accuracy and resistance to transients. Experimental studies have demonstrated the stable operation of the system under various load conditions and transient characteristic. The development is aimed at import substitution and improving the explosion safety of high-performance coal mines by creating modern domestic equipment.

Keywords: explosion protection, current sensors, insulation control, microprocessor protection, mining equipment.

For citation: A.I. Beloshistov, A.L. Serov and A.A. Beloshistov, "Microprocessor-based overcurrent protection system for 3.3 kV mining electrical equipment", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 32-54, 2025. EDN IJNNAC

I. Введение

Условия работы в угольных шахтах характеризуются рядом особенностей. Небольшие размеры горных выработок, наличие большого количества различного оборудования и протяженность кабельной сети создают аварийные условия. Учитывая особенности эксплуатации электрооборудования в угольных шахтах, большое внимание уделяется мерам защиты.

Наиболее опасными аварийными ситуациями в электрических сетях шахты являются аварии, связанные с короткими замыканиями в электрических цепях, которые являются основной причиной пожаров в подземных электроустановках угольных шахт. На их долю приходится более 80 % всех электрических пожаров. При коротком замыкании выделяется значительное количество тепловой энергии, способное привести к повреждению электрооборудования и вызвать пожар или даже взрыв метановоздушной смеси [1]. Максимальная токовая защита применяется повсеместно и является основным видом защиты в шахте [2, 3].

Максимальная токовая защита является системой, состоящей из датчиков тока и исполнительного блока. Датчики тока являются важнейшим компонентом этой системы [4].

В современной релейной защите все чаще применяются микропроцессорные решения. Это связано с их неоспоримыми достоинствами по сравнению с традиционными электромеханическими и электронными системами. Использование передовой микропроцессорной техники открыло возможность для реализации сложных алгоритмов цифровой обработки данных в реальном времени [5]. В результате возросли и требования к характеристикам датчиков тока, поскольку качество их выходного сигнала критически важно для точного измерения величины тока и эффективной работы устройства максимальной токовой защиты в целом [6].

В ГБУ «НИИВЭ» разработан комплекс защит, включающий в себя специализированные высоковольтные датчики тока и микропроцессорный блок. Данная система защищает от межфазных коротких замыканий за счет алгоритмов максимальной токовой защиты и от токов утечки на землю по средствам предварительного контроля изоляции.

Разработка решает задачу ускорения перехода отечественного горнодобывающего электрооборудования на перспективное напряжение 3,3 кВ. Повышение напряжения является магистральным путем развития электротехнической инфраструктуры шахт, так как напряжение 1140 В исчерпало себя по многим причинам. Однако этот переход невозможен без соответствующих средств защиты, гарантирующих взрывобезопасность. Представленный микропроцессорный комплекс является одним из фундаментальных элементов, который обеспечивает необходимый уровень безопасности и надежности для широкого внедрения систем электроснабжения 3,3 кВ, закладывая основу для нового поколения отечественного горнодобывающего электрооборудования.

II. Цель статьи

Научное обоснование эффективности разработанной микропроцессорной системы максимальной токовой защиты для рудничного оборудова-

ния 3,3 кВ, подтвержденное экспериментальными исследованиями ее быстродействия, точности измерений и устойчивости к переходным процессам в условиях, моделирующих реальную шахтную эксплуатацию.

III. Конструктивно-технологические решения высоковольтных датчиков тока

Датчики тока трансформаторного типа выполнены в виде сердечника, шихтованного из холоднокатанной кремнистой трансформаторной стали, на которую наматываются вторичная изолированная обмотка. Первичная обмотка датчика тока выполнена в виде шины. Наличие размагничивающего кольца обеспечивает необходимую предельную кратности, т.е. наибольший первичный ток, при котором погрешность не превышает заданное значение [7].

Разработана линейка высоковольтных датчиков тока для различных номиналов, однако в рамках данной статьи подробно рассматриваются конструктивные и эксплуатационные особенности модели ДТВ-125, отражающей все ключевые решения серии.

Внешний вид датчиков тока типа ДТВ представлен на рис. 1.

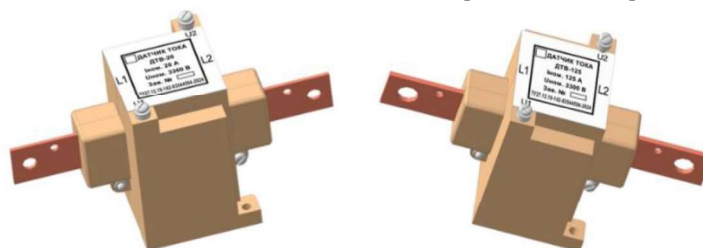


Рис. 1. Внешний вид высоковольтного датчика тока ДТВ-125

Fig. 1. Appearance of DTV-125 current sensors

Габаритные размеры высоковольтного датчика тока ДТВ-125 на рис. 2.

Первичная «обмотка» – это шина контролируемой цепи. Переменный ток в шине наводит во вторичной обмотке пропорционально уменьшенный ток, который преобразуется в падение напряжения на штатном нагрузочном резисторе. Этот сигнал напряжения подается на вход блока защиты. В датчиках предусмотрена гальваническая развязка выходной, слаботочной цепи от входной, силовой цепи, а также нормирование выходного сигнала до значения, удобного для измерения. Вся конструкция размещена в корпусе, предотвращающем повреждение изоляции и самих обмоток. Вторичный контур нагружается строго рассчитанным сопротивлением.

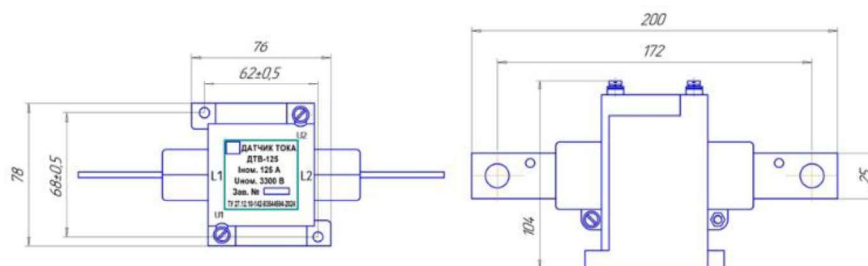


Рис. 2. Габаритные размеры высоковольтного датчика тока ДТВ-125

Fig. 2. Overall dimensions of the DTV-125 high-voltage current sensor

Выбор трансформаторных датчиков тока для шахтной защиты является принципиальным и обоснованным решением, продиктованным спецификой взрывоопасной среды. В отличие от датчиков Холла и катушек Роговского, традиционные трансформаторные датчики предлагают более высокий уровень надежности и безопасности, что является критически важным для шахтных условий. Ключевое преимущество заключается в их полной энергонезависимости — они не требуют внешнего питания или дополнительного интегратора для своей работы, а значит, гарантированно функционируют даже в момент аварии при просадках или полном пропадании оперативного напряжения. Это фундаментальное качество, дополненное простотой конструкции, обеспечивает также и взрывобезопасность, так как выходные цепи являются искробезопасными и не несут риска воспламенения. Кроме того, трансформаторные датчики лишены присущего датчикам Холла дрейфа нуля, который мог бы привести к ложным срабатываниям или, что хуже, к неотключению, и обладают гораздо более высокой помехоустойчивостью к электромагнитным наводкам от мощного шахтного оборудования, чем высокочувствительная, но уязвимая катушка Роговского. Таким образом, хотя современные активные датчики и превосходят трансформаторные по ряду параметров, их недостатки — зависимость от питания, сложность и меньшая устойчивость к суровым внешним условиям — делают их применение в системах безопасности шахт неоправданным риском.

Проведенные исследования и результаты лабораторных испытаний показали, что разработанный датчик тока имеют малые габариты, линейную характеристику в широком диапазоне изменения первичного тока и угловую погрешность менее 1 мс, что позволяет уменьшить общее время срабатывания устройства токовой защиты.

Выходной сигнал датчика тока имеет минимальные искажения, практически не сказывающиеся на точности измерения.

Характерные осциллограммы передачи сигнала для датчика тока

ДТВ-125 в установившемся режиме и при переходных процессах приведены на рис. 3. Данные и последующие осциллограммы получены в результате натуральных замеров в лабораторных условиях.

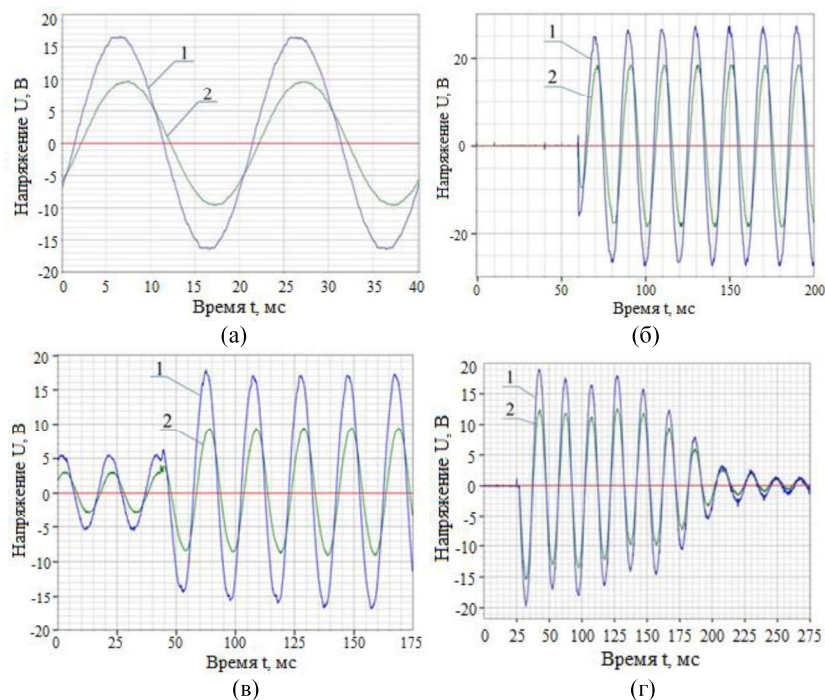


Рис. 3. Осциллограммы передачи сигнала датчиками тока ДТВ-125:
установившийся режим работы датчика тока (а); переходный процесс в режиме короткого замыкания при нулевых значениях начального тока (б); переходный процесс в режиме короткого замыкания при начальных значениях тока (в);
переходный процесс в режиме пуска двигателя (г)
1 – напряжение на измерительном шунте, пропорциональное току в силовой цепи;
2 – выходной сигнал датчика тока

Fig. 3. Oscillograms of signal transmission by current sensors DTV-125:
steady-state mode of operation of current sensor (a); transient in short-circuit mode at zero values of initial current (b); transient in short-circuit mode at initial current values (v); transient in engine starting mode (g)
1 – voltage on the measuring shunt proportional to the current in the power circuit;
2 – current sensor output signal

Зависимость выходного напряжения от величины тока в силовой цепи для датчиков тока типа ДТВ-125 приведена на рис. 4.

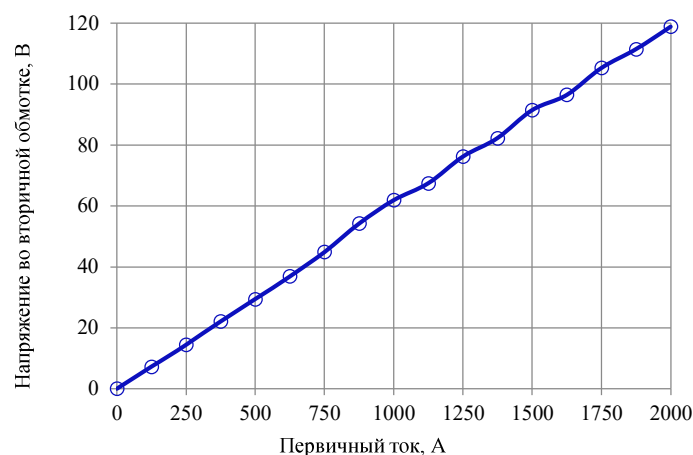


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения во вторичной обмотке датчика тока ДТВ-125 от первичного тока

Fig. 4. Dependence of output voltage in DTV-125 current sensor secondary winding on primary current

IV. Принципы построения и методика испытаний блока токовой защиты

Блок токовой защиты представляет собой микропроцессорное устройство на базе современного контроллера, работающее в комплексе с высоковольтными датчиками тока. Микроконтроллер непрерывно обрабатывает сигналы от датчиков, реализуя цифровые алгоритмы защиты с высокой точностью и быстродействием, а также осуществляет постоянный контроль сопротивления изоляции сети, что гарантирует надежную защиту как от токов короткого замыкания, так и от утечек на землю, своевременно отключая оборудование при превышении заданных уставок, даже в условиях сложных переходных процессов и помех, характерных для шахтных электросетей.

Выходной сигнал в виде напряжения с датчиков тока поступает на вход микропроцессорного блока защиты. Для согласования данного сигнала со входом АЦП микроконтроллера используется цепь согласования, включающая резистивный делитель, защитный стабилитрон, ограничивающий перенапряжения на портах микроконтроллера, а также простейший низкочастотный RC -фильтр для подавления высокочастотных помех. После предварительной обработки однополупериодный сигнал поступает на АЦП микроконтроллера.

Процесс аналого-цифрового преобразования организован с использованием прямого доступа к памяти (*DMA*) и прерываний, что обеспечивает непрерывное накопление данных без загрузки центрального процессора. В течение двух периодов сетевого напряжения (40 мс) оцифрованные значения накапливаются в буфере, после чего вычисляется их среднее арифметическое. Этот усредненный результат сравнивается с установленным порогом срабатывания.

Такая организация преобразования сигнала обеспечивает высокую помехоустойчивость и минимальное время отклика системы, что особенно критично для работы в условиях повышенных электромагнитных помех шахтных электросетей. Сочетание аппаратной фильтрации и эффективного алгоритма усреднения позволяет достичь высокой точности измерений и максимального быстродействия защиты.

Основные параметры микропроцессорного устройства максимальной токовой защиты приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры устройства токовой защиты

Table 1.
Current protection device parameters

Наименование основных параметров	Значение
Номинальное напряжение питания, В	36/69
Частота сети, Гц	50
Диапазон изменения рабочего напряжения, %	85÷115
Потребляемая мощность, Вт, не более	7
Время срабатывания при кратности тока ДТ к току уставки 1,5, мс, не более	100
Величина уставок сопротивления изоляции при номинальном напряжении, кОм: – для силовых цепей 1140 В – для силовых цепей 3300 В	110±10* и 300±80** 240±40* и 600±100**

Примечание: * – уставка «Аварийная»; ** – уставка «Предупредительная»

Программное обеспечение микроконтроллера играет ключевую роль в эффективности системы защиты, поскольку именно алгоритмы обработки сигналов определяют точность и быстродействие защиты. Блок-схема алгоритма работы наглядно демонстрирует структуру программы, что позволяет лучше понять логику ее функционирования: от первичного сбора данных с датчиков тока и до формирования управляющих сигналов. Такой визуализированный подход не только облегчает восприятие сложных алгоритмов, но и помогает оптимизировать программирование микроконтроллера и обеспечить надежную защиту оборудования в различных аварийных режимах, включая короткие замыкания и утечки тока [8, 9].

Блок-схема программного обеспечения микроконтроллера устройства токовой защиты приведена на рис. 5.

Защиты от однофазных замыканий на землю реализована с помощью функции контроля сопротивления изоляции. Для взрывоопасной среды шахты, где любая искра – это потенциальная катастрофа с человеческими жертвами, недопущение возникновения дуги при ОЗЗ является приоритетной задачей. Система контроля изоляции имеет две уставки: «предупредительную», которая при снижении сопротивления изоляции до определенного, не аварийного, уровня выдает световую сигнализацию, но не блокирует включение электрооборудования и «аварийную», которая уже не дает включить нагрузку, предотвращая развитие аварии. Главная цель – не допустить подачи силового напряжения на кабель с уже поврежденной изоляцией, тем самым предотвращая саму возможность возникновения дугового ОЗЗ под полным напряжением.

Классические схемы защиты на основе электромеханических реле, включая трехступенчатую токовую защиту и токовую защиту нулевой последовательности (ТЗНП), в современных условиях эксплуатации горнодобывающих предприятий демонстрируют ряд системных ограничений, обусловленных как принципиальными особенностями их построения, так и возросшими требованиями к безопасности и технологичности. Главный недостаток этих систем заключается в их реактивном характере – они начинают действовать только после возникновения аварийного режима, что в условиях шахты с высокой концентрацией метана и угольной пыли уже представляет собой критический риск. ТЗНП, например, часто оказывается неспособной эффективно обнаруживать высокоомные замыкания на землю, которые хотя и не вызывают значительных токов, но способны создавать устойчивые дуговые разряды, достаточные для воспламенения атмосферы. Кроме того, традиционные защиты обладают недостаточным быстродействием для выполнения жестких нормативных требований по отключению поврежденной линии в течение 100-150 мс, особенно при необходимости фильтрации пусковых токов мощных двигателей, которые могут многократно превышать номинальные значения. Эти проблемы усугубляются отсутствием в таких системах функций диагностики и предварительного контроля состояния оборудования, что не позволяет перейти от стратегии реагирования на аварию к стратегии ее профилактики. Таким образом, хотя традиционные защиты долгое время оставались отраслевым стандартом, архитектурные ограничения делают их малоприспособными для выполнения современных требований к безопасности и надежности систем электроснабжения опасных производственных объектов.

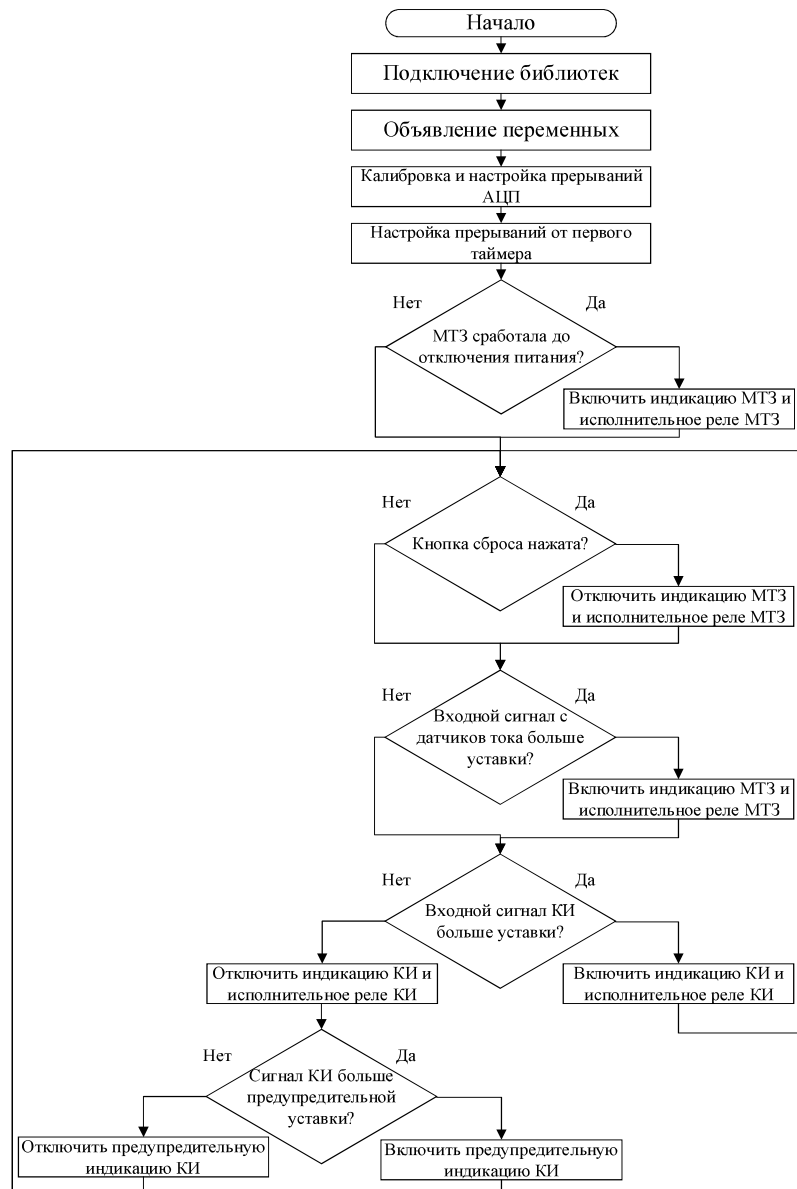


Рис. 5. Блок-схема программного обеспечения устройства токовой защиты

Fig. 5. Current protection device software block diagram

При проектировании блока защиты с функцией предварительного контроля сопротивления изоляции силовой сети учитывалось, что присоединительные цепи данного вида защиты должны быть устойчивы к многократным кратковременным воздействиям обратной ЭДС отключенных вращающихся электродвигателей. Затухание ЭДС происходит по сложному закону, так как имеет место изменение частоты и сопротивления двигателя. Самым неблагоприятным является выбег не нагруженного электродвигателя. Так как этот процесс более длительный во времени по своему воздействию на цепи контроля сопротивления изоляции. Экспериментальным путем определено время действия обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя. Осциллограмма обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя приведена на рис. 6.

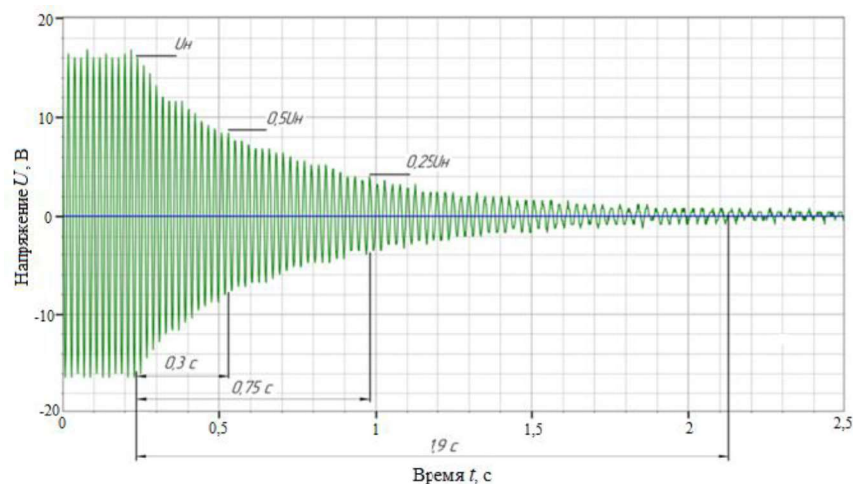


Рис. 6. Осциллограмма обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя

Fig. 6. Oscillogram of reverse EMF of disconnected rotating electric motor

Как видно из приведенной осциллограммы, время воздействия обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя не превышает 2 с. При этом в течение 0,3 с величина обратной ЭДС спадает до 0,5 начального значения. В течение 0,75 с ЭДС уменьшается до значения 0,25 начального значения. На базе полученных данных были проведены расчеты параметров цепи предварительного контроля изоляции.

Важнейшим условием обеспечения безотказной работы микропроцессорных устройства является принятие мер по защите входов микроконтроллера. Учитывая, что величина напряжения контролируемой сети

намного превышает величину источника оперативного тока, были приняты меры, обеспечивающие защиту входов микроконтроллера при протекании тока в цепи предварительного контроля сопротивления изоляции, обусловленного обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя. Проведенные исследования цепи предварительного контроля изоляции показали, что при различных видах воздействия величина сигнала на входе микроконтроллера не превышает допустимых значений. График изменения входного сигнала на микроконтроллере в зависимости от сопротивления контролируемой сети приведен на рис. 7.

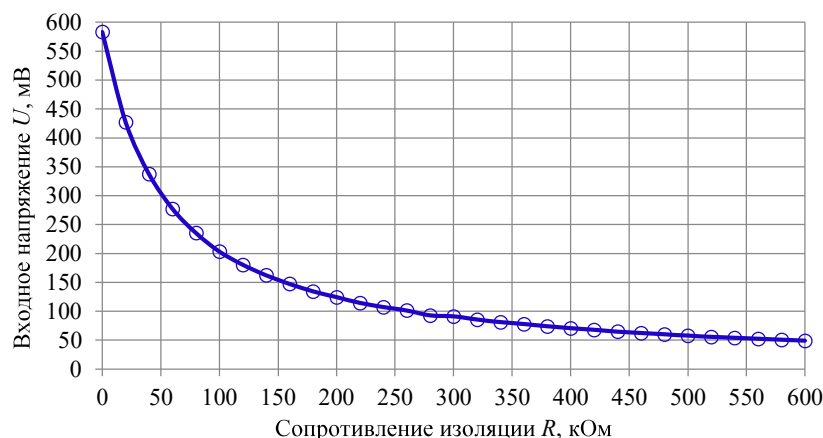


Рис. 7. График зависимости сигнала на входе микроконтроллера от величины сопротивления изоляции

Fig. 7. Dependence of microcontroller input signal on insulation resistance

Одним из показателей работы блока защиты служит невосприимчивость к ложным сигналам. Переходный процесс, сопровождающий коммутацию оборудования, в которое встроен блок защиты, объясняется тем, что на короткое время, на вход канала предварительного контроля изоляции сети поступает сигнал, зависящий от напряжения и параметров сети. Этот сигнал может вызвать кратковременное срабатывание канала предварительного контроля изоляции сети блока. Это связано с тем, что напряжение обратной ЭДС отключенного вращающегося электродвигателя значительно превосходит напряжение источника оперативного тока.

На рис. 8 представлена осциллограмма входного сигнала микроконтроллера, регистрирующая обратную ЭДС отключенного электродвигателя в режиме холостого хода.

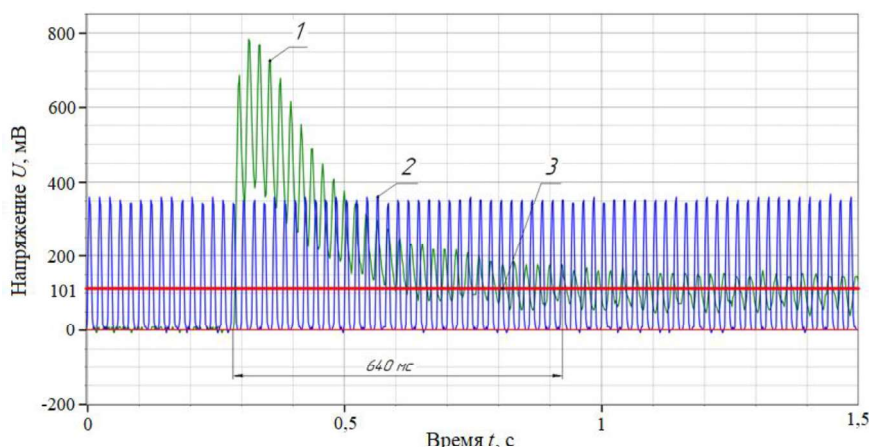


Рис. 8. Осциллограмма сигналов на входе микроконтроллера при регистрации обратной ЭДС отключенного электродвигателя:

1 – обратная ЭДС двигателя; 2 – сигнал уставки защиты;
3 – среднее значение уставки

Fig. 8. Oscillogram at microcontroller input at registration of reverse EMF of disconnected electric motor:

1 – motor reverse EMF; 2 – protection setpoint signal; 3 – average setpoint value

Эксперимент проводился при сопротивлении утечки 270 кОм, что близко к аварийной уставке силовой цепи 3,3 кВ, при этом электродвигатель работал в режиме холостого хода. Данные условия наиболее наглядно демонстрируют влияние обратной ЭДС электродвигателя на канал контроля изоляции. Как видно из осциллограммы, при остановке двигателя входной сигнал микроконтроллера превышает среднее значение уставки в течение 640 мс. Во избежание ложных срабатываний в данном режиме алгоритм программы был изменен следующим образом: при первом обнаружении превышения уставки в процессе оцифровки и усреднения сигнала контроля изоляции система выдерживает паузу 600 мс. Управляющий сигнал на реле формируется только в случае, если при повторной итерации входной сигнал по-прежнему превышает уставку. Предложенный алгоритм с задержкой 600 мс между итерациями контроля изоляции эффективно устраняет ложные срабатывания, вызванные обратной ЭДС электродвигателя.

Еще одним не менее важным показателем устройства токовой защиты является время срабатывания. Соблюдение требования к полному времени срабатывания электромагнитных пускателей при токах, превышающих уставку устройства максимальной токовой защиты в 1,5 раза, не бо-

лее 150 мс, является критически важным для обеспечения взрывобезопасности в угольных шахтах. В условиях потенциального скопления метана и угольной пыли даже кратковременное короткое замыкание может привести к образованию искры, способной инициировать взрыв. Быстрое отключение поврежденного участка цепи минимизирует энергию дуги, предотвращая нагрев окружающей среды до опасных температур. Это требование закреплено в ГОСТ 24754-2013 и подтверждено практикой эксплуатации шахтного оборудования, где даже незначительное превышение времени срабатывания защиты увеличивает риск аварий.

Время срабатывания устройства токовой защиты проверялось на нагрузочной установке с использованием высоковольтного датчика тока ДТВ-20 на 1-й, 5-й и 7-й уставках при токах в 1,5 раза выше тока уставки. Было проведено по 10 опытов на каждой уставке, результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2.
Время срабатывания блока при нулевом начальном токе

Table 2.
Unit response time at zero initial current

Уставка	Время срабатывания, мс									
1-я	41	43	50	39	61	70	58	41	65	51
5-я	38	47	42	55	51	56	42	45	50	36
7-я	43	56	66	38	39	64	62	58	57	63

Для примера на рис. 9 приведены осциллограммы, отображающие время срабатывания блока защиты с нулевым начальным током для 5-й уставки при токе в 1,5 раза выше тока уставки, а также время отключения силового контактора пускателя. В дальнейшем, если не указано иное, будут рассматриваться осциллограммы для этой уставки.

Однако применительно к реальным условиям эксплуатации шахтного электрооборудования наиболее вероятным аварийным сценарием является ситуация, когда защищаемый электродвигатель функционирует под номинальной нагрузкой. Для корректной оценки характеристик защиты в лабораторных условиях был воспроизведен именно этот рабочий режим. Измерения времени срабатывания проводились при наличии начального тока нагрузки с последующим мгновенным увеличением его до величины, соответствующей 1,5-кратному значению уставки. Результаты эксперимента приведены в табл. 3.

На рис. 10 приведена осциллограмма, отображающая время срабатывания блока защиты при наличии начального тока нагрузки при мгновенном увеличении тока в 1,5 раза превышающего ток уставки, а также соответствующее время отключения контактора.

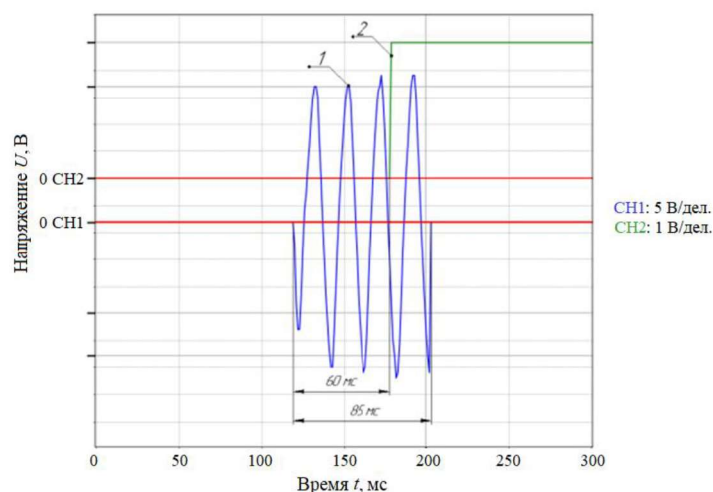


Рис. 9. Время срабатывания блока защиты и контактора с нулевым начальным током на 5-й уставке:
 1 – сигнал с датчика тока; 2 – сигнал с исполнительного реле блока защиты

Fig. 9. Response time of the protection unit and contactor with zero initial current at the 5th setpoint:
 1 – signal from current sensor; 2 – signal from protection unit actuating relay

Таблица 3.
Время срабатывания блока при ненулевом начальном токе

Table 3.
Unit response time at non-zero initial current

Уставка	Время срабатывания, мс									
1-я	47	48	50	58	52	55	49	40	59	65
5-я	25	31	32	34	35	42	45	45	48	50
7-я	30	35	50	51	52	57	62	63	71	74

Как следует из данных табл. 2 и 3, устройство токовой защиты в среднем срабатывает быстрее при ненулевом начальном токе нагрузки. Это объясняется тем, что, согласно алгоритму работы программы, входной сигнал с датчиков тока оцифровывается и усредняется за два периода синусоидального сигнала, следовательно, чем выше значение тока нагрузки перед возникновением аварийного режима, тем быстрее усредненное значение тока достигнет уставки при возникновении аварийной ситуации.

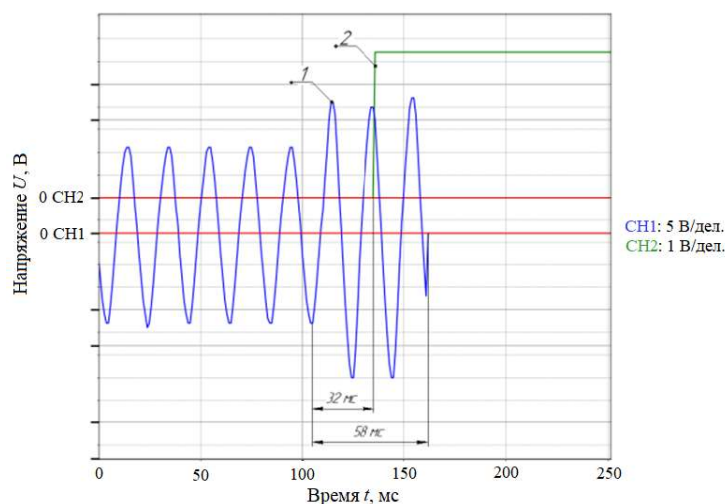


Рис. 10. Время срабатывания блока защиты и контактора с ненулевым начальным током на 5-й уставке:
 1 – сигнал с датчика тока; 2 – сигнал с исполнительного реле блока защиты

Fig. 10. Response time of the protection unit and contactor with non-zero initial current at the 5th setpoint:
 1 – signal from current sensor; 2 – signal from protection unit actuating relay

Таким образом, учитывая, что собственное время отключения контакторов типа КВТ не превышает 60 мс, экспериментальные данные подтверждают, что время срабатывания блока токовой защиты соответствует требованиям ГОСТ 24754-2013 для токов, превышающих уставку в 1,5 раза [10].

С целью углубленного изучения параметров защиты блока, а именно зависимости времени срабатывания от кратности тока нагрузки к уставке, были проведены дополнительные эксперименты, где ток нагрузки превышал уставку на 10, 20, 30 и 40 %. Результаты приведены в табл. 4.

Для визуализации зависимости времени срабатывания от величины перегрузки на рис. 11 представлены осциллограммы процесса срабатывания токовой защиты при различных кратностях тока нагрузки. Данные осциллограммы отображают время срабатывания исполнительного реле блока, а также время отключения контактора.

Таблица 4.
Зависимость времени срабатывания защиты от кратности перегрузки

Table 4.
Dependence of protection response time on overload rate

I_n/I_y	Уставка	Время срабатывания, мс										Среднее, мс
1,1	1-я	45	78	75	62	67	49	51	76	55	71	62,0
	5-я	61	48	61	75	81	59	52	69	76	59	
	7-я	59	68	51	66	49	51	59	49	67	72	
1,2	1-я	40	43	61	70	72	79	56	71	50	52	58,6
	5-я	51	49	66	47	67	43	61	76	53	50	
	7-я	63	58	47	74	58	67	45	46	74	69	
1,3	1-я	55	45	46	43	48	62	81	49	41	59	54,9
	5-я	64	65	58	41	46	56	69	48	61	48	
	7-я	52	74	57	42	70	45	55	55	58	55	
1,4	1-я	66	43	58	50	61	43	52	67	55	71	52,3
	5-я	66	40	48	48	65	45	61	47	44	45	
	7-я	37	31	37	38	55	56	70	59	56	55	

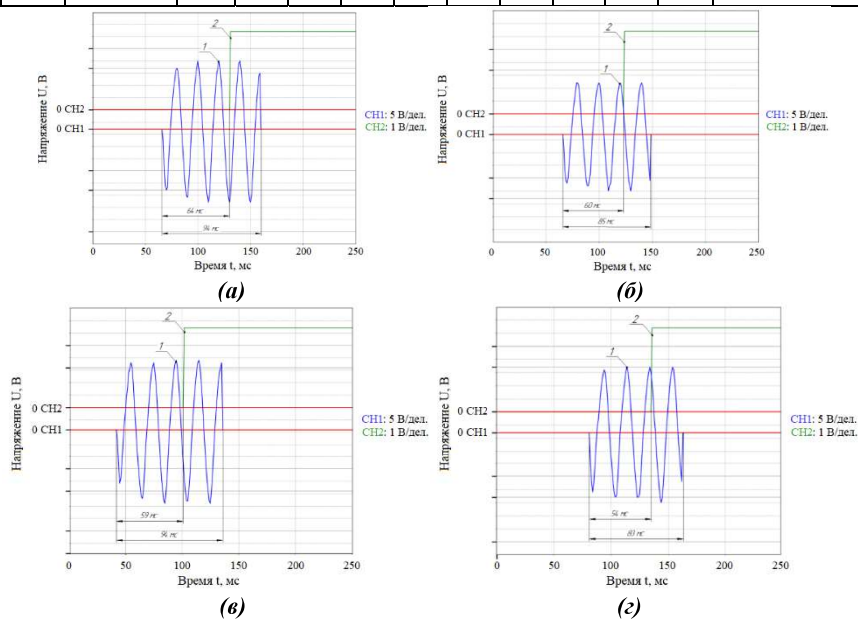


Рис. 11. Время срабатывания на 5-ой уставке при токе нагрузки (% уставки):
110 (а); 120 (б); 130 (в); 140 (г);

1 – сигнал с датчика тока; 2 – сигнал с исполнительного реле блока защиты

Fig. 11. Response time at 5th setpoint at load current (% of setpoint):

110 (а); 120 (б); 130 (в); 140 (г);

1 – signal from current sensor; 2 – signal from protection unit actuating relay

На основании экспериментальных данных построена зависимость времени срабатывания защиты от кратности тока нагрузки (рис. 12).

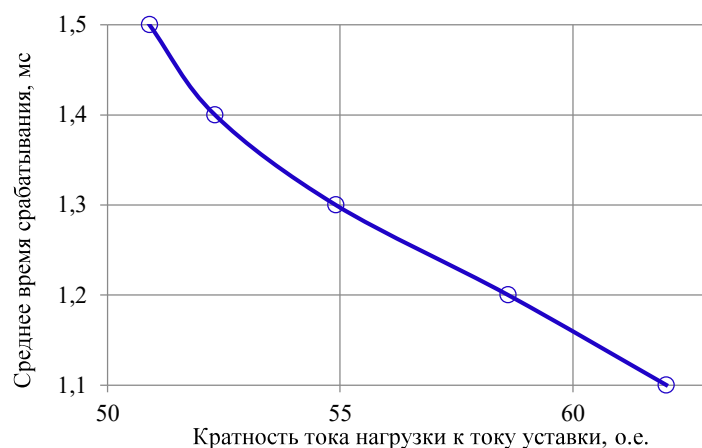


Рис. 12. Зависимость среднего времени срабатывания от кратности тока нагрузки

Fig. 12. Dependence of the average response time on the load current

Наблюдается обратная зависимость между временем срабатывания защиты и кратностью перегрузки: с ростом отношения $I/I_{уст}$ среднее время отключения уменьшается. Это объясняется ранее описанным алгоритмом обработки сигналов, согласно которому чем выше ток нагрузки, тем быстрее усредненное за два синусоидальных периода значение тока превысит уставку. Наблюдаемая зависимость времени отключения от величины нагрузки соответствует ожидаемым характеристикам алгоритма защиты.

Особое значение при оценке надежности блока токовой защиты имеют температурные испытания, учитывающие специфику шахтной эксплуатации. В условиях угольных шахт оборудование подвергается воздействию экстремальных температур: от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в горных выработках до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ в подземных подстанциях. Устойчивость к температурным колебаниям исключает ложные срабатывания и гарантирует стабильность работы защиты даже при термических перегрузках. Соответствие этим требованиям подтверждает готовность работы блока к работе в жестких условиях, регламентированных нормами ПБ 05-618-03 для шахтного электрооборудования.

В ходе испытаний блок токовой защиты подвергался температурному воздействию в климатической камере при крайних значениях рабочих температур: $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. После стабилизации температурного режима

проводилась поверка уставок максимальной токовой защиты и уставок срабатывания канала контроля изоляции. Полученные характеристики сравнивались с эталонными показателями, зафиксированными при нормальных условиях (20 ± 5 °C).

Результаты проверки уставок максимальной токовой защиты представлены в виде диаграммы на рис. 13.

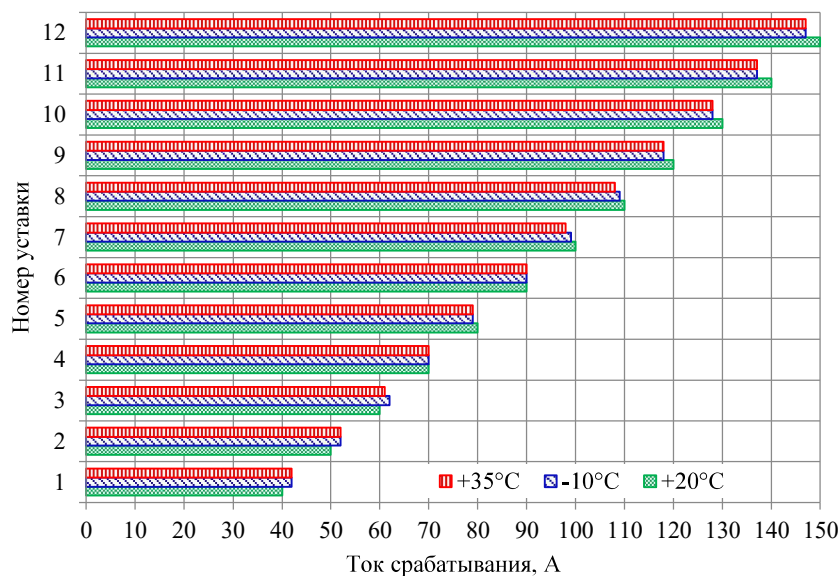


Рис. 13. Зависимость тока срабатывания максимальной токовой защиты от температуры окружающей среды для уставок 1-12

Fig. 13. Dependence of the tripping current of the maximum current protection on the ambient temperature for setpoints 1-12

Результаты испытаний подтверждают стабильность работы максимальной токовой защиты, так как отклонение от эталонной характеристики составило не более 5 %.

Сопротивление срабатывания канала контроля изоляции исследовалось для двух напряжений сети – 1140 В и 3300 В. При этом, помимо номинальных напряжений, испытания проводились при пониженном (85 % от номинального) и повышенном (110 % от номинального) напряжениях.

Результаты исследований приведены в диаграммах на рис. 14.

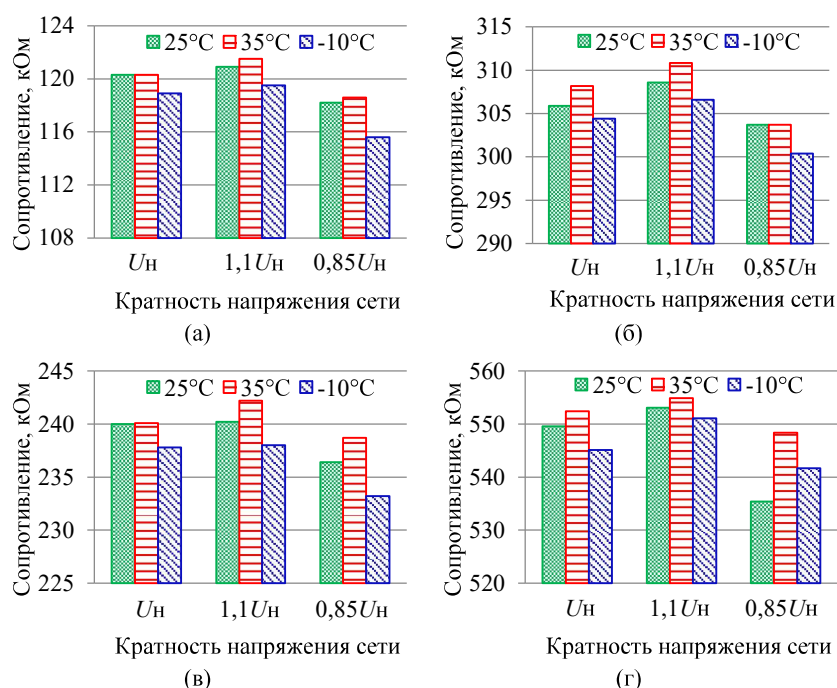


Рис. 14. Сопротивление срабатывания при номинальном напряжении сети 1140 В (а, б) и 3300 В (в, г) в зависимости от кратности напряжения и температуры окружающей среды:

уставка «Аварийная» (а, в); уставка «Предупредительная» (б, г)

Fig. 14. Actuation resistance at rated mains voltage 1140 V (a, b) and 3300 V (в, г) depending on voltage ratio and ambient temperature:
setpoint "Emergency" (a, в); "Warning" setpoint (b, г)

V. Выводы

Разработан и испытан комплекс микропроцессорной максимальной токовой защиты с контролем изоляции для рудничного оборудования 3,3 кВ, включающий высоковольтные датчики тока ДТВ и блок защиты.

Экспериментально подтверждено, что время срабатывания комплекса не превышает 100 мс при кратности тока 1,5 к уставке, что полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ 24754-2013 для обеспечения взрывобезопасности.

Предложен и апробирован алгоритм контроля изоляции, устойчивый к воздействию обратной ЭДС отключенных электродвигателей, что исключает ложные срабатывания в реальных условиях эксплуатации.

Показана высокая температурная стабильность характеристик защиты в диапазоне от -10°C до $+35^{\circ}\text{C}$, что гарантирует надежную работу в жестких условиях шахты.

Разработанный комплекс является перспективной отечественной разработкой, направленной на повышение надежности и безопасности систем подземного электроснабжения при переходе на повышенное напряжение 3,3 кВ.

© Белошистов А.И., 2025

© Серов А.Л., 2025

© Белошистов А.А., 2025

Поступила в редакцию 17.07.2025

Принята к публикации 02.10.2025

Received 17.07.2025

Accepted 02.10.2025

Библиографический список

- [1] ГОСТ Р 58585-2019. Оборудование горно-шахтное. Общие требования безопасности к системам электроснабжения и управления. Введ. 2020-04-01. М.: Стандартинформ, 2019. – 14 с.
- [2] ГОСТ 33968-2016. Защита от сверхтоков и контроль изоляции рудничного электрооборудования. Введ. 2018-03-01. М.: Стандартинформ, 2017. – 11 с.
- [3] Приказ Ростехнадзора от 19.11.2013 г. № 550 (ред. от 25.09.2018) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-19112013-n-550-ob-prikaz/> (дата обращения 01.01.2025).
- [4] Джанишиев С.И., Костин В.Н. Релейная защита и автоматика распределительной сети угольной шахты // Электроцех. 2015. № 1-2.
- [5] Гуревич В. Новая концепция построения микропроцессорных устройств релейной защиты // Компоненты и технологии. 2010. № 6 (107). С. 93-96.
- [6] Новожилов Т.А., Новожилов А.Н., Ляшков А.А., Волгина Е.М. Измерение переменного тока в проводнике для нужд релейной защиты // Омский научный вестник. 2016. № 3 (147). С. 67-73.
- [7] Данилов А. Современные промышленные датчики тока // Современная электроника. 2004. № 2. С. 26-35.
- [8] Слесарев А.И., Моисейкин Е.В., Устьянцев Ю.Г. Аспекты проектирования электронных схем на основе микроконтроллеров. Екатеринбург: УрФУ, 2018. – 136 с.
- [9] Кёниг А., Кёниг М. Полное руководство по PIC-микроконтроллерам PIC18, PIC10F, rfPIC. Киев: МК-Пресс, 2007. – 256 с.
- [10] ГОСТ 24754-2013. Электрооборудование рудничное нормальное. Общие технические требования и методы испытаний. Введ. 2016-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

References

- [1] Mining equipment. General safety requirements for power supply and control systems, GOST R 58585-2019, Apr. 2020.
- [2] Protection against overcurrent and insulation monitoring mine electrical equipment, GOST 33968-2016, Mar. 2017.
- [3] Order of Rostekhnadzor dated Nov. 19, 2013 no. 550 (as amended on Sep. 25, 2018) "Ob utverzhdenii Federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti "Pravila bezopasnosti v ugol'nyh shahtah" [On approval of Federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety rules in coal mines"]", *Official Internet portal of legal information*. [Online]. Available at: <https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-19112013-n-550-ob/prikaz/> [Accessed: Jan. 1, 2025] (in Russian).
- [4] S.I. Dzhaniyev and V.N. Kostin, "Relay protection and automation of a distribution network of coal mines", *Elektrocekh [Electrical workshop]*, no. 1-2 (in Russian).
- [5] V. Gurevich, "Novaya kontseptsiya postroeniya mikroprotseessornykh ustroystv releynoy zashchity [New concept of microprocessor relay protection devices]", *Komponenty i tekhnologii [Components and technologies]*, vol. 6, no. 107, pp. 93-96, 2010 (in Russian).
- [6] T.A. Novozhilov, A.N. Novozhilov, A.A. Lyashkov and E.M. Volgina, "The measurement of alternating current in conductor for the needs of relay protection", *Omsk Scientific Bulletin*, vol. 3, no. 147, pp. 67-73, 2016.
- [7] A. Danilov, "Sovremennye promyshlennye datchiki toka [Modern industrial current sensors]", *Sovremennaya elektronika [Modern electronics]*, no. 2, pp. 26-35, 2004 (in Russian).
- [8] A.I. Slesarev, E.V. Moiseykin and Yu.G. Ust'yantsev, *Aspekty proektirovaniya elektronnykh skhem na osnove mikrokontrollerov [Aspects of microcontroller-based electronic circuit design]*. Ekaterinburg: UrFU, 2018 (in Russian).
- [9] A. Koenig and M. Koenig, *Polnoe rukovodstvo po PIC-mikrokontrolleram PIC18, PIC10F, rPIC [Complete guide to PIC microcontrollers PIC18, PIC10F, rPIC]*. Kiev: MK-Press, 2007 (in German).
- [10] Mining electrical equipment of normal production. General technical requirements and test methods, GOST 24754-2013, Jan. 2016.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Белошистов Александр Иванович, заведующий комплексным научно-исследовательским отделом электрических аппаратов ГУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация.

Серов Андрей Леонидович, заведующий лабораторией комплексного научно-исследовательского отдела электрических аппаратов ГУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация.

Белошистов Алексей Александрович, инженер-конструктор комплексного научно-исследовательского отдела электрических аппаратов ГУ «НИИВЭ», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация.

Aleksandr I. Beloshistov, head of the integrated research department of electrical devices of the GU «NIIVE» Donetsk, DPR, Russian Federation.

Andrey L. Serov, head of the laboratory of the integrated research department of electrical devices of the GU «NIIVE», Donetsk, DPR, Russian Federation.

Alexey A. Beloshistov, design engineer of the integrated research department of electrical devices of the GU «NIIVE», Donetsk, DPR, Russian Federation.