

СИСТЕМА ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

*С.И. Джанишев, В.Н. Костин, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Россия*

Предложена двухканальная система защиты от коротких замыканий кабельной сети подземной части угольной шахты, включающая логическую и максимальную токовую защиты и обеспечивающая селективное отключение поврежденного элемента. С целью уменьшения времени простоя технологического шахтного оборудования при повреждениях в системе энергоснабжения разработаны алгоритмы централизованной автоматики.

Для угольных шахт, опасных по пыли и газу, в соответствии с Правилами безопасности [1] на линиях 3-10 кВ, отходящих от центральной подземной подстанции (ЦПП) и распределительных подземных пунктах (РПП), защита от токов короткого замыкания (КЗ) должна быть мгновенного действия (без выдержки времени). Кроме того, во всех случаях отключения сети защитами допускается применение автоматического повторного включения (АПВ) однократного действия, а также применение устройств автоматического включения резерва (АВР) при условии применения аппаратуры с блокировками против подачи напряжения на линии и электроустановки при повреждении их изоляции в результате КЗ.

В случае применения традиционных автономных цифровых устройств релейной защиты, а именно максимальных токовых защит (МТЗ), отключение КЗ в схеме электроснабжения будет происходить мгновенно и неселективно, т. е. будут отключаться все силовые выключатели на пути протекания тока КЗ от ЦПП до места повреждения. Согласование защит по времени недопустимо в соответствии с требованиями [1], а согласование защит по току невозможно вследствие небольших длин (сотни метров) кабельных линий в шахтных сетях.

Таким образом, при КЗ в схеме электроснабжения подземной части угольной шахты действие традиционных автономных максимальных токовых защит приведет к массовому отключению потребителей, что существенно снижает надежность электроснабжения. Восстановление схемы оперативными переключениями в системе электроснабжения увеличивает время простоя технологического шахтного оборудования.

Для повышения надежности электроснабжения потребителей и сокращения времени простоя технологического шахтного оборудования предлагается система двухканальной релейной защиты и централизованной автоматики как подсистема автоматизированной системы управления электроснабжением шахты (АСУ ЭС).

Двухканальная защита включает:

- 1) логическую защиту (ЛЗ) как основную;
- 2) максимальную токовую защиту (МТЗ) как резервную.

Основная защита – это МТЗ мгновенного действия, селективность которой обеспечивается с помощью блокировочных сигналов, передаваемых между РПП и ЦПП по каналам связи.

Резервная защита – это МТЗ мгновенного действия, осуществляющая неселективное отключение выключателя, по которому протекает ток КЗ. Исправление неселективной работы этой защиты предлагается путем централизованного автоматического или автоматизированного (с участием диспетчера) повторного включения (ЦАПВ).

В схемах с резервированием после отключения КЗ релейной защитой в ряде случаев должен осуществляться централизованный автоматический или автоматизированный ввод резервного питания (ЦАВР).

Обе защиты и централизованная автоматика требуют создания каналов для передачи данных о состоянии выключателей, срабатывании защит и для передачи команд на коммутации выключателей. Для современных систем управления технологическими процессами такое оборудование разработано и широко применяется. В частности, для подсистемы управления энергоснабжением шахт АСОДУ «Энерго» [2] используется каналобразующее оборудова-

ние для создания сети передачи данных с использованием *IndustrialEthernet*, *RS485*-интерфейса, или модемной линии на базе оптического или медного кабеля.

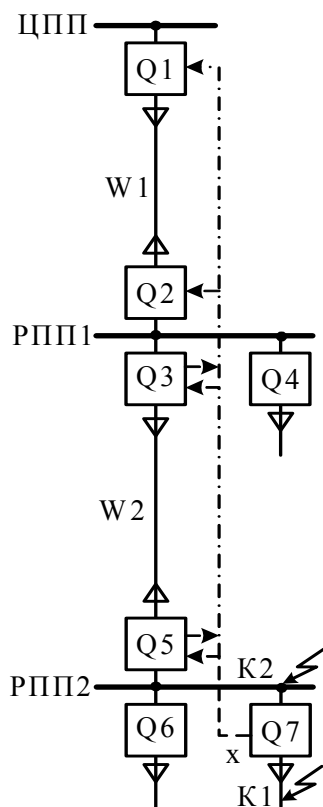


Рис. 1. Схема участка сети

Рассмотрим применение предлагаемых решений для участка схемы электроснабжения, приведенного на рис. 1 и включающего шины ЦПП и двух РПП, соединенных кабельными линиями *W*.

Релейная защита

Для отключения КЗ целесообразно использовать функцию логической защиты шин (ЛЗШ), реализуемую во всех современных микропроцессорных защитах и широко используемую в распределительных устройствах подстанций.

Принцип действия ЛЗШ заключается в следующем. На выключателях распределительного устройства токовую защиту выполняют двумя комплектами:

- первый «быстрый» комплект, имеющий выдержку времени 0,15-0,2 с, срабатывает, если через защиту протекает ток КЗ и нет блокирующего сигнала;
- второй «медленный» комплект работает с обычной селективной выдержкой времени, резервируя первую защиту.

В распределительных устройствах подстанций блокирующий сигнал передается от защит отходящих линий к комплекту защиты вводного выключателя с помощью общей шинки блокировки, расположенной вдоль всех ячеек отходящих линий.

Применительно к схеме рис. 1 при повреждении отходящей линии (точка *K1*) сработает «быстрый» комплект защиты этой линии, отключая выключатель *Q7*. Защита на вводе блокируется сигналом *x* (пунктирная линия на рис. 1), а второй «медленный» комплект этой защиты с обычной селективной выдержкой времени резервирует защиту отходящей линии.

Если повреждены шины (точка *K2* на рис. 1), блокирующий сигнал со стороны отходящих линий отсутствует. В этом случае срабатывает «быстрый» комплект защиты на вводе, отключая выключатель *Q5*. Второй «медленный» комплект этой защиты с обычной селективной выдержкой времени резервирует защиту ввода.

Если повреждены шины (точка *K2* на рис. 1), блокирующий сигнал со стороны отходящих линий отсутствует. В этом случае срабатывает «быстрый» комплект защиты на вводе, отключая выключатель *Q5*. Второй «медленный» комплект этой защиты с обычной селективной выдержкой времени резервирует защиту ввода.

Однако, использование функции ЛЗШ автономно внутри каждого РПП шахтной магистральной сети не обеспечит блокировку отключения выключателей других РПП. Так, например, при КЗ в точке *K1* (рис. 1) произойдет отключение выключателей *Q1* и *Q3* и потребители РПП1 и РПП2 останутся без питания. Для предотвращения отключения этих выключателей следует создать *дополнительные каналы* передачи блокирующего сигнала *x* к защитах на выключателях *Q1* и *Q3* (штрихпунктирная линия на рис. 1), т. е. расширить функции автономной ЛЗШ до логической защиты сети.

Резервная защита работает при отказе основной или используется как основная защита при отсутствии каналов связи между РПП и ЦПП. Однако непосредственное использование здесь второго «медленного» комплекта ЛЗШ с обычной селективной выдержкой времени противоречит требованиям [1]. Поэтому и резервная защита должна работать без выдержки времени.

В частности, при отсутствии каналов связи между РПП и ЦПП и КЗ в точке *K1* (рис. 1) произойдет мгновенное отключение выключателей *Q7*, *Q5*, *Q3*, *Q2* и *Q1*. Защита минимального напряжения по факту его исчезновения отключит остальные выключатели схемы. Все потребители РПП1 и РПП2 останутся без питания. При КЗ в точке *K2* (рис. 1) произойдет мгновенное отключение выключателей *Q5*, *Q3*, *Q2* и *Q1*. Защита минимального напряжения отключит остальные выключатели. Как и в первом случае, все потребители РПП1 и РПП2 останутся без питания.

Восстановление схемы после КЗ следует реализовать с помощью ЦАПВ и ЦАВР, алгоритмы работы которых будут рассмотрены ниже.

Таким образом, для надежного, быстрого и селективного отключения КЗ и уменьшения времени простоя технологического шахтного оборудования целесообразно применение двухканальной релейной защиты с правильно организованным их взаимодействием. Покажем на примере участка сети (рис. 1) варианты такого взаимодействия.

На всех выключателях схемы устанавливаются по два комплекта защит: ЛЗ и МТЗ, а между ЦПП, РПП1 и РПП2 прокладываются каналы передачи блокирующего сигнала x (штрихпунктирная линия на рис. 1).

При КЗ, например, в точке $K1$ (рис. 1) аварийный ток будет протекать через выключатели $Q1, Q2, Q3, Q5$ и $Q7$. Блокирующий сигнал x не должен позволить отключиться выключателям $Q1, Q2, Q3$ и $Q5$. Следовательно, при КЗ в точке $K1$ (рис. 1) логической защитой отключится только один выключатель $Q7$.

При КЗ на шинах РПП2 (точка $K2$ на рис. 1) логическая защита должна отключить выключатель $Q5$ и дать блокирующий сигнал x на выключатели $Q1, Q2$ и $Q3$.

В случае отказа логической защиты на каком-либо выключателе должна сработать резервная МТЗ и отключить этот выключатель без выдержки времени.

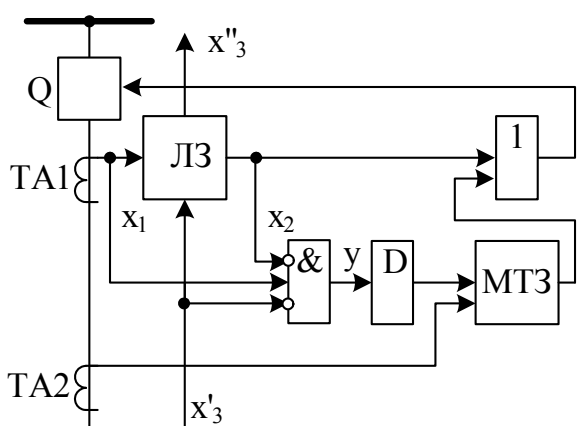


Рис. 2. Принципиальная схема двухканальной защиты

Указанная логика работы защит на выключателе Q реализуется схемой, приведенной на рис. 2, где приняты следующие обозначения: ЛЗ – логическая защита (основная); МТЗ – максимальная токовая защита (резервная); x_1 – сигнал тока КЗ присоединения; x_2 – сигнал отключения присоединения; x'_3 – сигнал блокировки, приходящий от защит, расположенных ниже; x''_3 – сигнал блокировки, посылаемый защитам, расположенным выше; $\&$ и 1 – логические элементы (конъюнктор и дизъюнктор); y – выходной сигнал конъюнктора; $TA1$ и $TA2$ – трансформаторы тока; D – задержка сигнала, требуемая для отстройки от времени срабатывания логических защит.

Для повышения надежности комплекты ЛЗ и МТЗ

должны получать сигналы от разных трансформаторов тока.

Основной канал защиты (ЛЗ) обеспечивает селективное отключение выключателя Q без выдержки времени. Резервный канал защиты (МТЗ) обеспечивает без выдержки времени отключение выключателя Q при отказе основного канала защиты.

Логика запуска МТЗ описывается булевым выражением

$$y = x_1 \bar{x}_2 \bar{x}'_3. \quad (1)$$

Выходной сигнал конъюнктора y через задержку D поступает на вход блока МТЗ и является сигналом запуска этой защиты. Запуск и срабатывание МТЗ будет при выходном сигнале конъюнктора $y=1$.

Из таблицы истинности (табл. 1), составленной для выражения (1), видно, что любое сочетание входных сигналов (1, 2, 3, 4, 6, 7, 8) кроме сочетания 5, не обеспечивает запуск МТЗ. Во всех случаях кроме случая 5 будет работать ЛЗ. Отказ ЛЗ характеризуется состоянием 5, в котором есть сигнал тока КЗ ($x_1=1$), сигнал блокировки отсутствует ($x'_3=0$), сигнал срабатывания ЛЗ отсутствует ($x_2=0$). При этом выходной сигнал конъюнктора $y=1$ и осуществляет запуск МТЗ.

Таблица 1

№ состояния	1	2	3	4	5	6	7	8
x_1	0	0	0	0	1	1	1	1
x_2	0	0	1	1	0	0	1	1
x'_3	0	1	0	1	0	1	0	1
y	0	0	0	0	1	0	0	0

Универсальная система представления электрической схемы

Правильная работа системы защиты и автоматики возможна только при адекватном представлении топологии исходной схемы сети. Такое представление должно быть универсальным, и в то же время точно отражающим структуру сети.

Для получения адекватного представления следует все выключатели разделить на структурные и фидерные. Структурные выключатели определяют структуру схемы – связи между ЦПП и РПП. Это головные выключатели линий между ЦПП и РПП и выключатели ввода в РПП.

Фидерные выключатели показывают присоединения отдельных потребителей к шинам ЦПП и РПП.

Применительно к рис. 1 структурными выключателями будут Q_1, Q_2, Q_3, Q_5 , а фидерными – Q_4, Q_6, Q_7 .

Кроме того, все выключатели должны делиться по уровню присоединения (ЦПП, РПП1, РПП2 ...).

Алгоритм ЦАПВ

Автоматика повторного включения широко используется в системах электроснабжения для повышения надежности электроснабжения. Для шахтной кабельной сети, имеющей свою специфику, повторное включение выключателей следует использовать для исправления неселективного отключения КЗ релейной защитой.

Как было отмечено выше, при КЗ в схеме электроснабжения подземной части угольной шахты действие традиционных автономных максимальных токовых защит приведет к массовому отключению потребителей, что существенно снижает надежность электроснабжения. Восстановление схемы оперативными переключениями в системе электроснабжения увеличивает время простоя технологического шахтного оборудования.

Для сокращения времени простоя технологического шахтного оборудования все переключения должны осуществляться централизованно с автоматизированного рабочего места (АРМ) энергодиспетчера, как это предусматривается, например, в подсистеме управления энергоснабжением шахт АСОДУ «Энерго» [2], в которой на экране главного компьютера АРМ-диспетчера отображается состояние всех выключателей, входящих в состав ЦПП и РПП, и контроль срабатывания защит.

Включение выключателей может осуществляться дистанционно диспетчером или, с согласия диспетчера, автоматически по заданному алгоритму. В последнем случае реализуются функции ЦАПВ, однако, с блокировкой включения выключателей поврежденного элемента системы электроснабжения.

Следует отметить, что повторное включение может оказаться недопустимым для некоторых потребителей угольной шахты. В частности, пуск конвейера с загруженной ходовой частью влечет за собой увеличение инерционных усилий, перегрузку тяговых цепей и привода. Особенно это важно для конвейеров большой протяженности, у которых существует опасность пробуксовки и опасность возникновения колебательного переходного процесса сбегующей ветви ленты. В таких случаях требуется блокировка соответствующего выключателя от включения и предварительная подготовка конвейера к пуску.

Алгоритм восстановления схемы после ее распада в результате отключения КЗ комплектами МТЗ может быть описан матрицей сигналов защит на выключателях ($x_i=0$ – защита не сработала, $x_i=1$ – защита сработала). В общем виде эта матрица содержит m столбцов и n строк, где m – число выключателей в цепи от ЦПП до точки КЗ, n – число состояний поля сигналов от релейных защит.

Возможность централизованного АПВ оценивается сигналом y ($y=1$ – АПВ допустимо, $y=0$ – АПВ недопустимо), получаемым по булевому выражению

$$y = x_1 x_2 x_3 \dots x_m \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 \dots x_m \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 \dots x_m \vee x_1 x_2 \bar{x}_3 \dots x_m \vee \dots \vee x_1 x_2 x_3 \dots \bar{x}_m. \quad (2)$$

Выражение (2) учитывает возможный отказ в срабатывании одной какой-то защиты. При $y=1$ выполняется ЦАПВ – централизованно включаются все структурные выключатели за исключением последнего выключателя Q_m . Из выражения (2) следует, что только при отказе защиты, ближайшей к месту КЗ, будет осуществляться «неполное» ЦАПВ.

Что касается фидерных выключателей, отключенных по факту исчезновения напряжения на шинах РПП, то их включение осуществляется также централизованно с учетом характера конкретных электроприемников.

Для пояснения вышеизложенного рассмотрим схему сети напряжением 3-10 кВ (рис. 3), в которой реализуются функции автономных МТЗ и ЦАПВ. Источниками питания служат разные секции шин ЦПП (ЦПП1 и ЦПП2), от которых питаются три РПП. Выключатель Q_{13} на РПП3 нормально отключен. Структура схемы определяется выключателями $Q_1, Q_3, Q_5, Q_7, Q_9, Q_{13}, Q_{10}, Q_{14}, Q_6, Q_4, Q_2$. Остальные выключатели фидерные.

При КЗ за фидерным выключателем (точка К1) отключатся без выдержки времени выключатели Q_{14}, Q_6, Q_4, Q_2 . Сигналы, приходящие от защит на этих выключателях, образуют следующую матрицу сигналов защит (табл. 2).

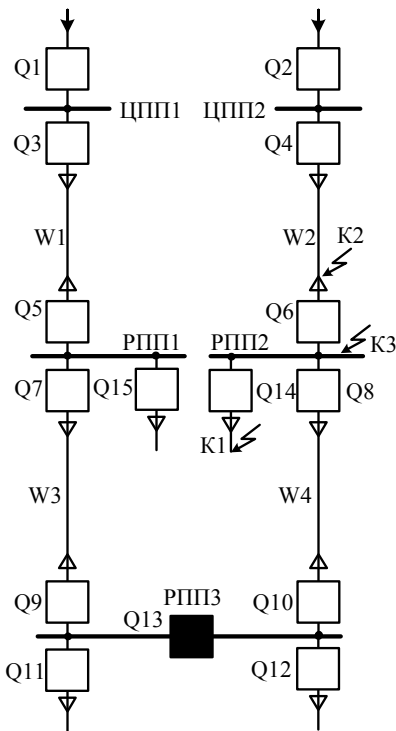


Рис. 3. Схема сети

Таблица 2

№	$Q_2(x_2)$	$Q_4(x_4)$	$Q_6(x_6)$	$Q_{14}(x_{14})$	y
1	1	1	1	1	1
2	0	1	1	1	1
3	1	0	1	1	1
4	1	1	0	1	1
5	1	1	1	0	1

Единицы в клетках матрицы означают наличие сигнала от защиты, нули – отсутствие сигнала. Строки матрицы показывают возможные сочетания сигналов при наличии одной ошибки (отказе одной защиты).

Возможность централизованного АПВ оценивается сигналом y ($y=1$ – АПВ допустимо, $y=0$ – АПВ недопустимо), получаемым по булевому выражению

$$y = x_2 x_4 x_6 x_{14} \vee \bar{x}_2 x_4 x_6 x_{14} \vee x_2 \bar{x}_4 x_6 x_{14} \vee x_2 x_4 \bar{x}_6 x_{14} \vee x_2 x_4 x_6 \bar{x}_{14}. \quad (3)$$

При $y=1$ централизованно должны включаться выключатели Q_2, Q_4, Q_6 . Однако в случае 5 (отказ защиты на выключателе Q_{14}) будет рекомендовано включить только выключатели Q_2 и Q_4 .

Алгоритм ЦАВР

Автоматика ввода резервного питания широко используется в распределительных устройствах подстанций при электроснабжении ответственных потребителей от двух и более независимых источников питания.

Рассмотрим централизованный запуск этой автоматики для шахтной распределительной кабельной сети.

Алгоритм работы ЦАВР зависит от места КЗ в схеме электроснабжения шахты и месторасположения выключателя, размыкающего схему, потребители которой получают питание от двух источников. В соответствии с [1] запрещается для подземных условий применение кольцевых схем электроснабжения.

ЦАВР должен срабатывать после таких КЗ, в результате отключения которых даже после АПВ часть РПП остаются без питания, т.е. при КЗ на линиях, связывающих отдельные РПП или при КЗ на шинах РПП (например точки К2 и К3 на рис. 3).

Стандартный алгоритм ввода резервного питания при КЗ в точке К2 (рис. 3): отключение ввода Q10 по исчезновению напряжения на шинах и включение секционного выключателя Q13 – оставит потребителей РПП2 без питания. Поэтому алгоритм ЦАВР следует построить по аналогии с алгоритмом ЦАПВ – включение всех выключателей, кроме последнего перед местом повреждения. Отличие будет в направлении включения выключателей. Если при ЦАПВ включение структурных выключателей осуществляется в направлении от источника питания (шин ЦПП) к месту повреждения, то при ЦАВР направление включения должно осуществляться от выключателя, нормально размыкающего схему, к месту повреждения.

Применительно к схеме рис. 3 при КЗ в точке К2 после срабатывания релейной защиты (отключения выключателя Q4) по факту исчезновения напряжения отключаются структурные выключатели Q6, Q8 и Q10. В этом случае следует централизованно включить выключатели Q13, Q10 и Q8 и не включать выключатель Q6, ближайший к месту повреждения.

При КЗ в точке К3 после отключения выключателя Q6 следует централизованно включить выключатели Q13 и Q10 и не включать выключатель Q8.

Включение фидерных выключателей отключившихся по факту исчезновения напряжения следует включать как и при ЦАПВ с учетом характера конкретных электроприемников.

Заключение:

1. Предложена двухканальная система защиты от КЗ подземной части системы электропитания угольной шахты, включающая логическую и максимальную токовую защиты и обеспечивающая без выдержки времени селективное отключение поврежденного элемента.

2. С целью уменьшения времени простоя технологического шахтного оборудования из-за повреждений в системе электроснабжения разработаны алгоритмы централизованной автоматики, позволяющие реализовать функции автоматического повторного включения и ввода резерва. Показано, что функции централизованной автоматики реализуются даже при отказе одной защиты в схеме электроснабжения шахты.

Список литературы

1. Правила безопасности в угольных шахтах. ПБ 05-618-03, 2004 г.
2. Компания ДЕП. Горношахтная автоматика. АСОДУ «Энерго». [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.dep.ru/page/gornavt_energo/, свободный. – Загл. с экрана.
3. Соловьев А. Л., Шабад М. А. Релейная защита городских электрических сетей 6 и 10 кВ. СПб.: Политехника, 2007.