УДК 622.81

С.З. Шкундин, М.В. Хиврин

ОПТИМИЗАЦИЯ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ БЕЗОПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

На угольных шахтах с взрывоопасной атмосферой, разветвленной сетью протяженных горных выработок и сложными горногеологическими условиями к каналам связи предъявляются особенно высокие требования т.к. они не должны уменьшать параметры надежности многофункциональной информационной системы в целом. Требования к шахтным многофункциональным системам безопасности (МФСБ) изложены в государственном стандарте (ГОСТ Р 55154-2012). Однако, при реализации таких систем в шахтах, опасных по газопроявлениям возникают задачи уплотнения каналов связи с сигналами от многообразных средств подсистем контроля и управления. При этом возникает необходимость обеспечения приоритетности и высокой скорости передачи аварийных сигналов. Рассмотрены особенности своевременной передачи аварийной информации по шахтным каналам связи, в том числе, в интегрированной общешахтной системе передачи информации с использованием оптимально уплотненных каналов связи с учетом их пропускной способности.

Ключевые слова: многофункциональный, канал связи, информационный, интерфейс, взрывозащищенный, угольная шахта, подсистема, программное обеспечение, технические средства, управление, контроль, оператор, линии связи.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-222-229

В соответствии со стандартом ГОСТР 55154-2012 МФСБ представляет собой комплекс систем и средств, обеспечивающих решение задач организации и осуществления безопасного производства и информационной поддержки контроля и управления технологическими и производственными процессами в нормальных и аварийных условиях.

МФСБ представляет собой совокупность электрических, электронных и программируемых технических средств, объединенных в системы и подсистемы, обеспечивающих:

• предотвращение условий возникновения различных видов опасности геодинамического, аэрологического и техногенного характера;

• работоспособность систем противоаварийной защиты людей и оборудования;

• уменьшение ущерба от произошедшей аварии.

Наряду с МФСБ на шахтах функционирует автоматизированная система оперативного диспетчерского контроля и управления (АСОДУ).

Задачей АСОДУ является создание условий для нормального функционирования технологических процессов, оперативный контроль и управление для обеспечения соответствия технологиче-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 2. С. 222–229.
© С.З. Шкундин, М.В. Хиврин. 2018.

ских процессов заданным параметрам, а задачей МФСБ — создание безопасных условий работы, предупреждение и предотвращение аварий и уменьшение потерь при возникновении аварийных ситуаций.

В горных выработках используется разнотипное оборудование и специализированные подсистемы, осуществляющие процесс сбора информации о параметрах технологических процессов, а также состояния оборудования и устройств. Информация из горных выработок поступает по каналам связи на автоматизированные рабочие места (АРМ) горного диспетчера, диспетчера по безопасности и главных специалистов.

Алгоритмы технологического управления объектами реализуются программно-техническими средствами локальных подсистем автоматизации, и общешахтной системы в целом.

Таким образом, на нижнем уровне реализуются циклы технологического и противоаварийного управления, обеспечивая оперативность выработки управляющих воздействий. Оперативный сбор информации о контролируемых объектах в режиме реального времени позволяет оптимизировать технологические и производственные процессы.

МФСБ и АСОДУ могут работать или по отдельным линиям связи или по совмещенным (уплотненным), что экономически более целесообразно. В этом случае можно рассматривать систему контроля, управления и безопасности как интегрированную сложную техническую систему, объединяющую на основе единого программно-аппаратного комплекса с общей информационной средой и единой базой данных технические средства, предназначенные для контроля технологических процессов и защиты шахты от нормированных угроз.

Перспективным направлением реализации систем контроля и управления на крупных промышленных предприятиях, в т.ч. угольных шахтах, является переход на иерархические (многоуровневые) структуры, отличительной особенностью которых является передача части функций от центрального вычислительного комплекса локальным средствам более нижнего уровня иерархии, в том числе, функций предварительной обработки массивов данных и многих функций по принятию логических решений.

В связи с этим увеличивается нагрузка на каналы передачи информации нижнего уровня.

Отличительной особенностью таких систем является передача части функций от центрального вычислительного комплекса локальным средствам более низкого уровня иерархии, в том числе функций предварительной обработки массивов данных и функций по принятию логических решений. Управляющий контроллер работает в режиме реального времени и осуществляет основной цикл управления. В качестве аргументов при расчете управляющего вектора берутся значения от УСО и дополнительные переменные, передаваемые с пульта оператора.

В результате в цикле управления получается управляющий вектор, направляемый на каналы ввода-вывода УСО, и дополнительный кадр выходных данных, посылаемый контроллером «наверх». Этими данными может быть полный набор участвующих в процессе переменных, включая входные, выходные и расчетные. Передавать в систему отображения желательно только то, что непосредственно необходимо оператору и в первую очередь сигналы, связанные с безопасностью.

Функциональные возможности системы разделены на два уровня. Первый (нижний) уровень — контроллеры и локальные УСО, работающие на шине контроллера. Второй (верхний) уровень —

пульт оператора (рабочая станция или промышленный компьютер), подключенные к магистральной шине.

Преимущества интегрированных шахтных многофункциональных систем можно рассмотреть на примере реализации функций, предлагаемых в «Гранч МИС» (Новосибирск) и «Микон III» (Екатеринбург).

Принцип действия «Гранч МИС» основан на преобразовании параметров рудничной атмосферы с помощью датчиков в электрические сигналы, передаче этих сигналов по проводным линиям связи, измерение этих сигналов контроллерами и анализ измеренных значений (сравнение с заданными допустимыми значениями — уставками) с целью выработки аварийных сигналов и сигналов управления шахтным оборудованием, обеспечивающим поддержание безопасного аэрогазового режима в горных выработках. Контроллеры через маршрутизаторы передают данные об измеренных параметрах на верхний уровень, состоящий из сервера, автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора и АРМ администратора.

Основные технические характеристики «Гранч МИС»:

- время срабатывания автоматической газовой защиты по метану составляет не более 15 с;
- максимальное количество каналов, обслуживаемых одним контроллером, составляет 48 измерительных, либо 80 входных логических;
- количество линий связи для связи с модемами серии SBNI в одном контроллере (маршрутизатор на основе контроллера) — от 2 до 12;
- длительность цикла автоматического опроса одного измерительного канала — не более 1,5 мс;
- задержка изменения состояния канала коммутации, при достижении аварийных значений контролируемых параметров или отказе датчиков основных измерительных каналов, приводящих к блокированию производственной деятельности (задержка времени срабатывания МИС), — не более 50,0 мс.

В системе предусмотрена возможность изменения интервала циклического опроса контроллеров сервером, при этом максимальное значение времени цикла не должно превышать:

- по основным параметрам (объемная доля метана, оксида углерода, диоксида углерода и кислорода, концентрация пыли в рудничном воздухе, скорость воздушного потока) — 1 мин;
- по дополнительным параметрам — 5 мин.

Система «Микон III» обеспечивает:

- возможность использования различных протоколов, интерфейсов и каналов передачи передачи информации;
- возможность подключения с помощью OPC-серверов технических средств к любым современным общепромышленным системам SCADA, ERP и MES;
- магистральную передача разнородной информации в измерительных системах, автоматизированных системах оперативно-диспетчерского управления, системах связи и системах автоматического управления и контроля (САУК) в нормальных и аварийных ситуациях.

Магистральный участок реализуется с использованием технологии Ethernet, при этом высокоскоростную передачу рекомендуется осуществлять через оптическое волокно. Линии высокоскоростной связи разделены на сегменты, которые гальванически изолированы друг от друга. При использовании технологии xDSL применяются стандартные шахтные телефонные и сигнальные кабели.

Низкоскоростная связь (полевого уровня) реализуется с использованием интерфейса RS-485 по медным проводникам в шахтных телефонных и сигнальных кабелях, сформированным в витые не-

экранированные пары. Линии низкоскоростной связи разделены на сегменты, которые гальванически изолированы друг от друга. В линиях низкоскоростной связи используются стандартные шахтные телефонные и сигнальные кабели.

Система передачи данных на уровне низкоскоростной связи RS-485 обеспечивает взаимодействие с модулями удаленного ввода-вывода и с подземными вычислительными устройствами, датчиками скорости воздуха, метана, устройствами регистрации персонала и транспорта (из состава системы позиционирования горнорабочих и транспорта) и другими устройствами, которые оборудованы интерфейсом RS-485, в том числе через репитеры-барьеры искробезопасности ПБИ-485. Подключение перечисленных устройств к подземному узлу связи осуществляется через соответствующий преобразователь интерфейсов.

Структурная схема сети нижнего уровня зависит от расположения горных выработок, в которых применяются специальные двухпроводные шахтные кабели, контроллеры, коммутаторы и репитеры. Для передачи информации на этом уровне обычно используется искробезопасная шахтная полевая шина на основе искробезопасной версии интерфейса RS-485 и сетевого протокола Modbus RTU (шахтная полевая шина RS-485).

При возникновении аварийной ситуации информация о возникшей опасности должна иметь приоритет перед технологической информацией и передаваться на центральный пункт с высокой скоростью, так как от этого, в значительной степени, зависит своевременное принятие мер по уменьшению материальных потерь, а возможно и предотвращению человеческих жертв.

Загруженность каналов связи в интегрированной системе зависит от количества и скорости передаваемой информации по каналу связи, а надежность и своевременность передачи аварийной информации зависит от пропускной способности используемого канала связи.

Для оценки пропускной способности шахтного интегрированного канала связи, использующего интерфейс RS485 с сетевым протоколом Modbus RTU можно воспользоваться уравнениями Клода Шеннона.

В соответствии с теоретическими положениями Клода Шеннона количество информации I_i при появлении события a_i с вероятностью P_i оценивается величиной:

$$I_i = log_2\left(\frac{1}{P_i}\right) = -log_2 P_i \qquad (1)$$

Энтропия H источника сообщения способного выдать N вариантов исходов события a_i составит:

$$H = \sum_{i=1}^{N} P_i log_2\left(\frac{1}{P_i}\right) = -\sum_{i=1}^{N} P_i log_2 P_i \qquad (2)$$

Если каждый символ a_i из множества неравновероятных событий $\{a_i\}$ выражен l двоичными знаками, то вероятность $P(a_i) = P_i$ появления определенного знака a_i в m событиях будет обратно пропорциональна числу сочетаний из m элементов по l: $N_l = l^m$

Тогда по формуле (1), с учетом $1/P_i = N_i = l^m$ количество информации I_1, в сообщении, переданном l знаками:

$$I_1 = \log_2 l^m = m * \log_2 l \qquad (3)$$

Если для передачи символа a_i (цифры или буквы) используют m-градаций, то объем информации, переданной одним символом, составит $\log_2 m$ бит.

Объем Q передаваемой информации за время T:

$$Q = N*\log_2 m = (T/\Delta T)\log_2 m \qquad (4)$$

где $N = (T/\Delta T)$ — число символов за время T; ΔT — длительность передачи одного символа a_i.

Если десятичное число градаций m перевести в двоичное число, то получим

число двоичных разрядов, необходимых для передачи символа a_i

Из (4) средняя скорость $R_и$ передачи информации в интервале времени T определяется по формуле (1-ая теорема Шеннона):

$$R_и = (\log_2 m)/\Delta T \qquad (5)$$

где m — число градаций одного знака сигнала; ΔT — время передачи этого знака.

При передаче двоичных символов 0 и 1 имеем $m = 2$. $R_и = v = 1/\Delta T$ бит/с, т.е. скорость передачи информации равна скорости v передачи интервалов (или значения 0 и 1).

При $m > 2$, $R_и > v$. Предельная скорость передачи информации по каналу, с использованием m-градаций сигнала, т.е. пропускная способность канала $C_к$ (channel capacity)

$$C_к = R_и = (\log_2 m)/\Delta T \qquad (6)$$

Интервал квантования по времени выбирают по теореме В.А. Котельникова $\Delta T = 1/2f_в$ ($f_в$ — верхняя частота спектра). Тогда

$$R_и = 2f_в * \log_2 m \qquad (7)$$

Если амплитуда информационного процесса изменяется в пределах ΔS и мы его хотим передать с интервалами квантования по амплитуде δS, то $m = \Delta S/(\delta^{\delta} S)$ и скорость R_s передачи информации сигналом $S(t)$ определяется по формуле Найквиста

$$R_s = 2f_{Bs} * \log_2\left(\frac{\Delta S}{{}^{\delta}\delta S}\right) \qquad (8)$$

Скорость передачи информации — это среднее количество информации, передаваемой по каналу в единицу времени. Если в единицу времени передавать $U_к$ символов, а среднее количество информации на символ $H(k)$, то

$$dJ(k)/dt = U_к H(k) \qquad (9)$$

где $J(k)$ — поток информации в канале.

Средняя скорость поступления информации от источника сообщений называется производительностью.

Если источник выдает $U_и$ символов в единицу времени, то его производительность

$$dJ(u)/dt = U_и H(и) \qquad (10)$$

где $J(u)$ — поток информации от источника.

Скорость передачи информации по каналу без помех зависит как от технических характеристик канала (m, $U_к$), так и от свойств входного сообщения (P, $U_и$) где m — число символов в комбинации (кодовом слове) т.е.число градаций одного знака сигнала, отображающей возможное количество дискретных значений N_i.

Если безизбыточное входное сообщение, обладает максимальной энтропией

$$H_{max}: H_{max} = \log_2 m,$$

то максимально возможная для данного канала скорость передачи информации:

$$C_k = \left[\frac{dJ(k)}{dt}\right]_{max} = U_k \log_2 m \qquad (11)$$

где $C_к$ — величина пропускной способности канала, т.е максимальная скорость передачи информации по каналу с данными техническими характеристиками.

Согласно (9) и (10) видно, что в общем случае при избыточности входного сообщения, отличной от нуля, скорость передачи информации по каналу меньше пропускной способности $C_к$.

По стандарту EIA RS-485 скорость передачи по каналу связи с использованием интерфейса RS485 зависит от вида и длины линии связи и выбирается из ряда: 62,5 кбит/с 1200 м (одна витая пара); 375 кбит/с 500 м (одна витая пара); 500 кбит/с; 1000 кбит/с; 2400 кбит/с 100 м (две витых пары); 10 000 кбит/с (10 м).

Интерфейс RS-485 используется совместно с сетевым протоколом Modbus

Адрес подчиненного устройства	Номер функции	Данные	CRC
1 байт	1 байт	$N < 253$ (байт)	2 байта
Следовательно максимальный размер передаваемого по сети пакета составляет около 256 байт			

RTU. Modbus RTU — коммуникационный протокол, основанный на клиент-серверной архитектуре. Состав кадра посылки показан в таблице.

Уравнение (11) позволяет определить пропускную способность канала связи при использовании интерфейса RS-485 и протокола Modbus RTU.

Предположим передача информации по каналу связи осуществляется со скоростью 62,5 кбит/с. Тогда длительность одного импульса («0» или «1») составляет около16 мкс. Если максимальный размер пакета Modbus по стандарту составит 250 байт т.е. 2000 бит, то время передачи пакета максимального размера равно 0,032 с (16 мкс*2000 бит = 32 000 мкс).

За 1 с может быть передано около 31 пакетов. Энтропия источника информации на входе линии связи определяется количеством возможных состояний цифрового 8 разрядного слова т.е.:

$$H = \log N = \log_2 m = 8 \text{ бит}$$

Следовательно, в соответствии с (11) пропускная способность $C_к$ канала связи в данном случае равна:

$$C_к = U_к \log_2 m = 31*8 = 248 \text{ бит/с}$$

Теперь, предположим, необходимо передать информацию по шахтному телефонному кабелю от аналогового датчика контроля взрывоопасной атмосферы. Полоса пропускания шахтного телефонного кабеля составляет около 3000 Гц.

Для передачи по цифровому каналу сигнала от аналогового датчика необходимо использовать аналого-цифровой преобразователь. По теореме Котельникова частота дискретизации $f_Д$ сигнала должна быть не менее удвоенной максимальной величины полосы пропускания т.е. 6000 Гц. Если используется 8-разрядный аналогово-цифровой преобразователь, то производительность источника по (8) равна:

$$f_Д * H = 6000*8 = 48\,000 \text{ бит/с}.$$

Для неискаженной передачи сигнала в реальном масштабе времени пропускная способность канала связи должна быть не меньше производительности источника, что не соблюдается в данном случае. Для рассмотренного случая величина производительности передатчика АЦП должна быть не более 248 бит/с.

Аэрологическая защита является одной из главных составляющих МФСБ. От надежной работы подсистемы аэрогазового контроля в значительной степени зависит безопасность работ на угольных шахтах. Своевременное обнаружение взрывоопасной концентрации газа позволяет избежать больших материальных и человеческих потерь и немаловажное значение в этом имеет эффективное использование шахтных каналов связи. На современных больших шахтах по каналам связи передается огромное количество информации от устройств системы безопасности и от технических средств контроля технологическими процессами, в том числе от тысяч датчиков и исполнительных механизмов.

Ограниченная пропускная способность существующих каналов передачи информации должна учитываться при выборе проводных линий связи (совмещенных или отдельных, выделенных только для систем безопасности), а также, возможно, переход на использование в некоторых случаях волоконно-оптических кабелей.

С появлением радиотехнических систем передачи информации в шахте (Гранч) возникает проблема оптимального выбора каналов связи. Проводные каналы дешевле, поскольку радиоканалы требуют обустройства в выработках приемопередающих антенн, однако их ограниченная пропускная способность значительно меньше и здесь необходимо принимать оптимальное, компромиссное решение основываясь на количестве источников информации, их производительности и отношению к реальному времени.

В любом случае передача аварийных сигналов должна иметь приоритет и высокое быстродействие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шкундин С.З.*, *Берикашвили В.Ш.* Теория информационных процессов и систем. — М.: Изд-во «Горная книга», 2012. — 474 с.
2. *Вознесенский А.С.* Средства передачи и обработки измерительной информации. — М.: Изд-во МГГУ, 1999. — 266 с.
3. *ГОСТ Р 55154-2012*. Оборудование горно-шахтное. Системы безопасности угольных шахт многофункциональные. Общие технические требования.
4. *Крук Б.И.*, *Попантонопуло В.Н.*, *Шувалов В.П.* Телекоммуникационные системы и сети. Современные технологии. Т. 1. — М.: Горячая линия-Телеком, 2004. — 647 с.
5. *Система* газоаналитическая шахтная многофункциональная «Микон III» ИГТ.071000.100.00 РЭ. Руководство по эксплуатации, www.ingortech.ru›dokumenty18/category/188.
6. Интерфейс последовательной передачи данных. Стандарт ANSI EIA/TIA*-485-A, http://www.bookasutp.ru/
7. *Wozencraft J.M.*, *Jacabs I.M.* Principles of communicates engineering.–a. John Wiley and Sons, 1985.
8. *Papoulis A.* Probability random variables and Stochastic processes. — Mc Graw–Hill, 1985.
9. *Lee Y.W.* Statistical theory of communication. — Yon Wiley and Sons, 1990.
10. *Parson E.* Stochastic processes. — Holden–Day, 1988.
11. *Laning J.H. Jr.*, *Battin R.H.* Random processes in automatic control. — Mc Graw–Hill, 1996.
12. ATIS committee PRQC. Network topology. ATIS Telecom Glossary 2007. Alliance for Telecommunications Industry Solutions. Basics of C & Ku Band Scatmag.com. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шкундин Семен Захарович[1] — доктор технических наук, профессор,
Хиврин Михаил Васильевич[1] — кандидат технических наук,
доцент, e-mail: hivrin@mail.ru,
[1] ИТАСУ НИТУ «МИСиС».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 2, pp. 222–229.

S.Z. Shkundin, M.V. Khivrin

DATA TRANSMISSION CHANNEL OPTIMIZATION IN MULTIFUNCTION SAFETY SYSTEMS OF COAL MINES

Multifunction safety systems (MSS) of coal mines are intended to prevent emergency situations due to various geodynamic, aerological and other industrial risks using methods and means of emergency protection and on-line control of consistency between process parameters and settings. Engineering or modernization of systems for monitoring, control and security involves modern equip-

ment of long-range communication and programming support, which inevitably intensifies traffic in data channels of a mine. Data transmission channels must ensure high-rate and reliable passage of large bulk of process and emergency information. Therefore coal mines with explosive atmosphere, multi-branch system of roadways and complex geological conditions impose specifically severe requirements on communication channels as they should maintain the desired reliability of the whole multifunction information system. The multifunction mine safety system requirements are set by the state standard (GOST R 55154-2012). In mines categorized as gas-hazardous, communication channels receive signals from numerous varied subsystems of monitoring and control. In this case, it is necessary to ensure ranking and high rate of transmission of emergency signals. The article analyzes features of prompt transmission of emergency information in communication channels of a mine information system using multiplex lines, considering their capacity.

Key words: multifunction, communication channel, information, interface, explosion-protected, coal mine, subsystem, programming support, equipment, control, monitoring, operator, communication lines.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-222-229

AUTHORS

Shkundin S.Z.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor,
Khivrin M.V.[1], Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: hivrin@mail.ru,
[1] Institute of Information Technologies and Automated Control Systems,
National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Shkundin S.Z., Berikashvili V.Sh. *Teoriya informatsionnykh protsessov i sistem* (Theory of information processes and systems), Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2012, 474 p.

2. Voznesenskiy A.S. *Sredstva peredachi i obrabotki izmeritel'noy informatsii* (Measurement information transmission and interpretation facilities), Moscow, Izd-vo MGGU, 1999, 266 p.

3. *Oborudovanie gorno-shakhtnoe. Sistemy bezopasnosti ugol'nykh shakht mnogofunktsional'nye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. GOST R 55154-2012* (Mining equipment. Multifunction systems for coal mines. General operating specifications. State Standart R 55154-2012).

4. Kruk B.I., Popantonopulo V.N., Shuvalov V.P. *Telekommunikatsionnye sistemy i seti. Sovremennye tekhnologii*. T. 1 (Telecommunications systems and networks. Modern technologies, vol. 1), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2004, 647 p.

5. *Sistema gazoanaliticheskaya shakhtnaya mnogofunktsional'naya «Mikon III» IGT.071000.100.00 RE. Rukovodstvo po ekspluatatsii*, available at: www.ingortech.ru›dokumenty18/category/188.

6. *Interfeys posledovatel'noy peredachi dannykh. Standart ANSI EIA/TIA*-485-A*, available at: www.bookasutp.ru/.

7. Wozencraft J.M., Jacabs I.M. *Principles of communicates engineering*. a. John Wiley and Sons, 1985.

8. Papoulis A. *Probability random variables and Stochastic processes*. Mc Graw–Hill, 1985.

9. Lee Y.W. *Statistical theory of communication*. Yon Wiley and Sons, 1990.

10. Parson E. Stochastic processes. Holden–Day, 1988.

11. Laning J.H. Jr., Battin R.H. *Random processes in automatic control*. Mc Graw–Hill, 1996.

12. *ATIS committee PRQC. Network topology. ATIS Telecom Glossary 2007*. Alliance for Telecommunications Industry Solutions. Basics of C & Ku Band Scatmag.com.