



УДК 621.317:622.831

© *Чье Ен Ун, Д. А. Куликов, 2009*

АЛГОРИТМЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Чье Ен Ун — д-р техн. наук, проф. кафедры «Автоматика и системотехника», тел. (4212) 37-51-91, e-mail: chye@ais.khstu.ru; *Куликов Д. А.* — вед. электроник кафедры «Автоматика и системотехника», тел.: (4212) 45-35-31, e-mail: denis@redcom.ru (ТОГУ)

Представлена структура программно-аппаратных средств автоматизированной сейсмоакустической системы контроля горного давления, которая эксплуатируется на одном из рудников Читинской области. Представлены алгоритмы повышения достоверности доставки измерительных данных путем адаптации к состоянию канала связи, включающие в себя механизмы помехоустойчивого кодирования данных.

The architecture of software-and-hardware components of an automated seismoacoustic system for mountain pressure control is described. The algorithms are presented for improving reliability in the measurement data transmission by way of adapting to the data link with the mechanisms of noise-resistant data coding.

Ключевые слова: автоматизированная система контроля горного давления, помехоустойчивое кодирование, горные работы, передача измерительных данных, надежность доставки данных.

Введение

Важнейшей проблемой при ведении подземных горных работ на больших глубинах и в сложных горно-геологических условиях является прогнозирование и предотвращение опасных проявлений горного давления, которые нередко приводят к катастрофическим последствиям. При решении проблем управления горным давлением на подземных рудниках и шахтах в последнее время все большее применение находят геофизические методы оценки и контроля геомеханического состояния массива горных пород — как менее трудоемкие и достаточно информативные. Создание отвечающей современным требованиям системы геоакустического контроля возможно на базе широкого

применения микропроцессорных и инфокоммуникационных технологий, программного обеспечения и специально разработанных алгоритмов, учитывающих тяжелейшие условия проведения горных работ и сопровождающих их явлений.

На основании современных тенденций построения информационно-измерительных комплексов (ИИК) [1, 2] была разработана автоматизированная сейсмоакустическая система контроля горного давления (АСКГД) [3–6]. АСКГД использует геоакустический метод оценки и контроля состояния массива горных пород, базирующийся на экспериментально наблюдаемом и теоретически изученном явлении акустической эмиссии (АЭ). Структурная схема АСКГД представлена на рис. 1.

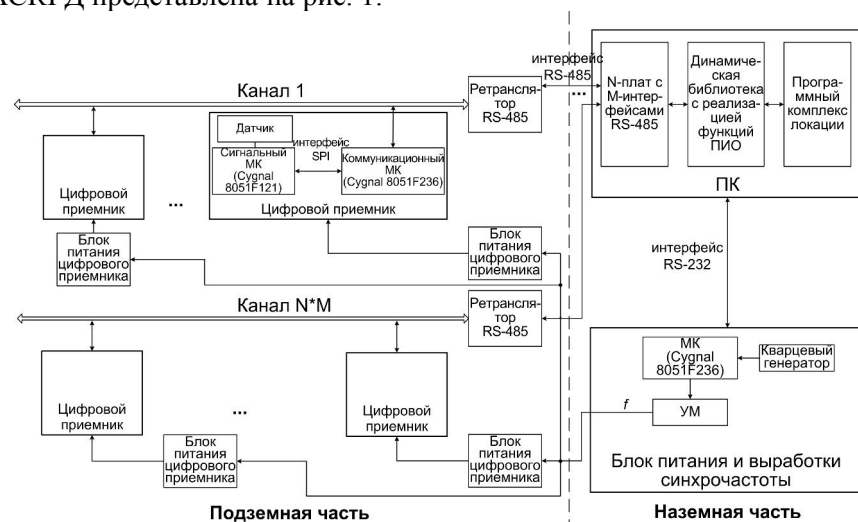


Рис. 1. Структурная схема АСКГД

Надежность функционирования ИИК в целом определяется надежностью сети передачи данных (СПД). Таким образом, одной из задач, решаемой при создании ИИК, является построение СПД, которая обеспечивает надежную взаимосвязь между разнесенными в пространстве компонентами комплекса и учитывает условия горных работ. Этапу создания СПД предшествует этап исследования функционирования канала связи в условиях действующего горнодобывающего предприятия.

Построение модели канала связи

Для получения количественных характеристик ошибок в кадрах, передающихся по каналу связи, в шахтном поле первоначально проводились двухнедельные испытания. В ходе их было установлено, что возрастание количества кадров с ошибками приходится на местное время интервалах [3:00; 6:00] и [9:00; 16:00], когда проводятся наиболее интенсивные работы в шахтном поле (рабочие смены). Проведенный анализ экспериментальных данных удобно представить в виде графа модели канала, который показан на рис. 2.

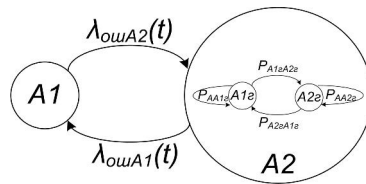


Рис. 2. Логическое представление модели канала связи с учетом использования модели Гилберта для описания состояния $A2$

Состоянию $A1$ соответствуют выходные дни, а также временные интервалы рабочих дней, когда горные работы в шахтном поле не проводятся или отсутствуют аварийные ситуации на физических линиях связи. Состоянию $A2$ соответствуют рабочие дни или присутствие аварийных ситуаций на физических линиях связи, и рост интенсивности ошибок λ_{osh} приходится на время проведения горных работ и различных ремонтных мероприятий в шахтном поле. Переход между состояниями $A1$ и $A2$ в прямом направлении осуществляется под действием потока ошибок с интенсивностью $\lambda_{oshA2}(\Delta t)$, а в обратном направлении – $\lambda_{oshA1}(\Delta t)$. Результаты практических исследований показали, что происходящее в состоянии $A2$ можно рассматривать с точки зрения известной модели Гилберта.

Анализ эффективности протокола информационного обмена (ПИО)

При отсутствии механизмов адаптации, заложенных в базовые процедуры ПИО (передача и ожидание таймаута или подтверждения доставки), возникновение любого числа ошибок в кадре канального уровня приводит к его отбрасыванию на приемной стороне и повторной передаче. В результате при постоянном наличии ошибок не возможна передача группы связанных кадров, например, сигналограммы размером 4 Кб в состоянии канала связи $A2$, что приводит к нарушению функционирования АСКГД.

Для анализа эффективности выбранного ПИО в канале связи при различных значениях вероятности ошибки для кадра длиной l_{Ax} – $p_{osh}(l_{Ax})$ предлагается использовать зависимость относительной скорости передачи информации от количества повторных передач m – $E_{отнAx}(m)$, которая определяется выражением

$$E_{отнAx}(m) = p_{npAx}(m) \frac{l_{uAx}}{Z_{Ax}(m)}, \quad (1)$$

где $p_{npAx}(m)$ – вероятность правильного приема кадра при m попытках передачи, определяемая выражением (2);

l_{uAx} – размер полезной нагрузки в кадре;

Z_{Ax} – общий объем данных, передаваемых по каналу связи в обоих направлениях, определяемый выражением (3).

$$\begin{aligned}
 p_{npAx}^{(m)} &= p_{npAx}^{(1)} + p_{npAx}^{(1)}p_{ouu}(l_{Ax}) + p_{npAx}^{(1)}(p_{ouu}(l_{Ax}))^2 + \\
 &+ \dots + p_{npAx}^{(1)}(p_{ouu}(l_{Ax}))^{m-1} = p_{npAx}^{(1)} \left(1 + \sum_{m=2}^m (p_{ouu}(l_{Ax}))^{m-1} \right) = \\
 &= p_{npAx}^{(1)} \frac{1 - (p_{ouu}(l_{Ax}))^m}{1 - p_{ouu}(l_{Ax})} = 1 - (p_{ouu}(l_{Ax}))^m ;
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$Z_{Ax}^{(m)} = (l_{Ax} + l_{cl}) \sum_{m=1}^m p_{ouu}(l_{Ax})^{m-1}, \quad (3)$$

где l_{Ax} – размер кадра данных;

l_{cl} – размер служебного кадра с повторным запросом данных.

На рис. 3 представлен график зависимости $E_{отнA2}(m)$ при передаче сигналограммы длиной 4000 байт для различных значений p_{ouu} .

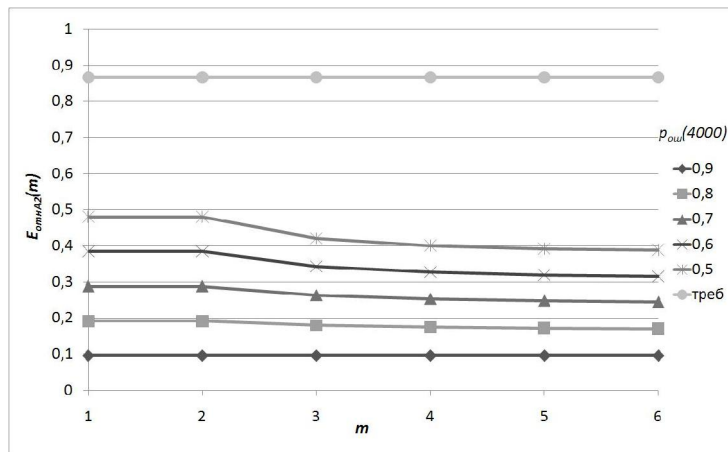


Рис. 3. Зависимость $E_{отнA2}(m)$ при различных значениях $p_{ouu}(4000)$

Из представленного на рис. 3 графика можно сделать вывод, что выполнение требований (значения с обозначением *треб*) к темпу передачи сигналограмм невозможно из-за возникающих в канале связи ошибок и требуется увеличение p_{npA2} . $E_{отнA2}$ составляет 20–40 % от максимально достижимой, что позволяет передать не более двух сигналограмм в секунду. Анализ, проведенный для алгоритма доставки с подтверждением каждого кадра из последовательности с использованием выражения (1), также показывает невозможность при вероятностях битовых ошибок $p_{bouu} > 4 \cdot 10^{-4}$ обеспечить заданные требования к темпу передачи сигналограмм, что показывает необходимость введения дополнительных методов повышения достоверности доставки данных в состоянии A2. Таким образом, эффективная работа СПД невозможна без оперативной адаптации внутренних параметров АСКГД к текущему состоянию дискретного канала связи. Изменяемыми внутренними параметрами



СПД и ПИО являются: количество и алгоритм повторных передач кадров; размер кадра; включение или отключение механизмов повышения достоверности доставки данных; скорость передачи данных в канале связи.

Оценка характеристик канала связи и алгоритмы адаптации

Для оценки характеристик нестационарного канала связи предлагается использовать механизм периодической передачи известной последовательности фиксированной длины $l_{\text{тест}}$. В результате оценивания происходит расчет следующих значений: средних $\overline{D_{A1z}}$, $\overline{D_{A2z}}$ и максимальных $D_{A1\text{max}}$, $D_{A2\text{max}}$, $D_{A1\text{max}}$, $D_{A2\text{max}}$ длин состояний; кратностей битовых ошибок в блоке $\chi(n_{\text{bou}}, n)$; количества смен состояний n_{A1} , n_{A2} , n_{A1z} , n_{A2z} ; вероятностей ошибки в каждом состоянии p_{bouAx} . По результатам анализа влияния ошибок на передачу основных структур данных АСКГД и известных алгоритмов повторной передачи предлагается два алгоритма адаптации к состоянию дискретного канала связи, которые включаются при переходе канала связи из состояния $A1$ в $A2$ и отключаются при обратном переходе:

- алгоритм включения в состоянии $A2$ подтверждения доставки каждого кадра и помехоустойчивого кодирования сообщения только в случае получения подтверждения об искажении кадра с независимыми контрольными суммами – ДКПиПК;
- алгоритм включения в состоянии $A2$ подтверждения доставки каждого кадра и включения механизмов помехоустойчивого кодирования с независимыми контрольными суммами – ДКиПК.

Представленные алгоритмы относятся к семейству алгоритмов с гибридной решающей обратной связью.

Помехоустойчивое кодирование измерительных данных в АСКГД

Для помехоустойчивого кодирования измерительных данных в АСКГД предложено использовать метод многопорогового декодирования [7], который современным высокоэффективным мажоритарным декодером и устраняет эффект группирования ошибок, вследствие которого методы повторного декодирования сообщения долгое время являлись малоэффективными. Он обладает следующими основными преимуществами:

- крайне малое число операций на пороговом элементе такого декодера требует небольшого объема вычислений;
- уникальная способность мажоритарных процедур исправлять во многих случаях гораздо большее число ошибок, чем это гарантируется кодовым расстоянием d используемого кода;
- простая расширяемость кодера и декодера при увеличении длины используемого кода и как следствие кодирующего регистра.

Среди широкого класса кодов, допускающих мажоритарное декодирование, выделяются самоортогональные коды (СОК) сверточного типа, допускающие очень эффективное многопороговое декодирование. Для подсистемы помехоустойчивого кодирования в АСКГД требуется блочный код с длиной

кодирующего регистра кратной байту. Учитывая сказанное, для применения МПД в АСКГД требуется осуществить преобразование кодера и декодера сверточного СОК к блоковой структуре. При преобразовании сверточного СОК с кодовой скоростью R в квазициклический блоковый СОК размер регистра информационных символов k_{\min} имеет длину не менее:

$$k_{\min} = (2n_A - n_0)R. \quad (4)$$

Из (4) получаем величину n_A :

$$n_A = \frac{1}{2} \left(\frac{k_{\min}}{R} + n_0 \right). \quad (5)$$

Для блокового кода n_A также называется кодовой длиной блока, из чего следует, что при получении сверточного СОК должно выполняться неравенство

$$n_A \leq k. \quad (6)$$

Используя (5) и (6), можно получить минимальные значения k для требуемых блоковых квазициклических кодов. Блоковый квазициклический СОК получается из сверточного СОК путем добавления строк в полную матрицу сверточного кода сдвинутых на $i-1$ символов, где i – номер строки в полной матрице. Таким образом, получаем зависимость

$$k_{\min} = 2k_1 - 1, \quad (7)$$

где k_1 – число разрядов в регистре сдвига кодера, которое определяется максимальной степенью порождающего многочлена $G(X)$ в составе порождающей матрицы исходного сверточного кода.

Учитывая (5) и (7) при выполнении условия (6), получаем итоговую формулу для вычисления максимальной степени порождающего полинома, из которого можно получить требуемый блоковый квазициклический СОК:

$$\deg_g(x) = \frac{k_{\min} + 1}{2} - 1,$$

где $\deg_g(x)$ – максимальная степень порождающего полинома $g(x)$ сверточного СОК.

Декодер типа МПД для блокового квазициклического СОК длиной 16 бит для двух итераций I с заданным d приведен на рис. 4. Кодер блокового квазициклического СОК находится в левой части декодера и включает в себя информационный регистр IR и полусумматоры по модулю 2.

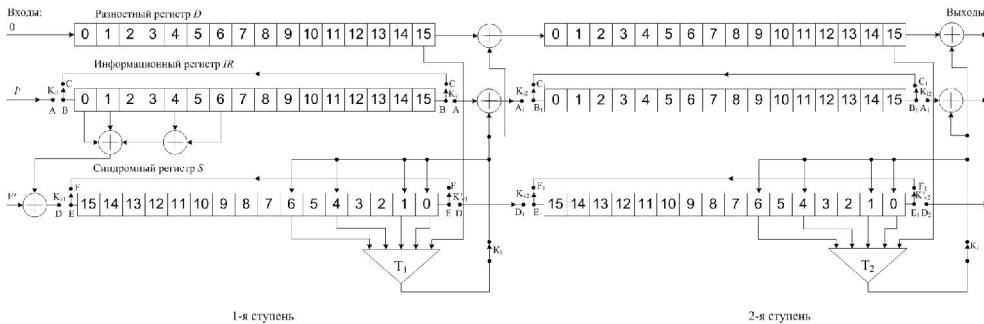


Рис. 4. МПД декодер для квазициклического СОК с $R=1/2$, $n_A=14$, $d=5$, при $I=2$

При программной реализации любого метода помехоустойчивого кодирования определяющими факторами его внедрения являются скорость работы, а именно задержка кодирования и декодирования, алгоритмическая сложность реализации. Количество операций N_k кодера определяется выражением

$$N_k = k(d - 1) + k. \quad (8)$$

Количество операций МПД $N_{МПД}$ определяется выражением:

$$N_{МПД} = k(I + 1 + 2p_{bou})d + k(d + 1). \quad (9)$$

В частном случае для СПД АСКГД алгоритмические оценки (8 и 9) позволяют получить величины задержки в темпе передачи $t_{tx-delay}$ и поступления $t_{rx-delay}$ данных с учетом коэффициента увеличения алгоритмической сложности внедрения $K_{сл}$, известной производительности МК цифрового приемника (25 MIPS) и типового ПК (2000 MIPS), они представлены в табл. 1.

Таблица 1

Величины задержки

k , бит	p_{bou}	d	I	N_k	$N_{МПД}$	l , байт	MIPS	$K_{сл}$	$t_{tx-delay}$, мс	$t_{rx-delay}$, мс	$t_{rx-delay_{БЧХ}}$, мс
16	$1 \cdot 10^{-4}$	5	3	80	416	100	25	5	1	8,3	60
16	$4 \cdot 10^{-4}$	5	5	80	576	100	25	5		11,5	80
16	$1 \cdot 10^{-4}$	5	3	80	416	100	2000	3	0,01	0,04	2
16	$4 \cdot 10^{-4}$	5	5	80	576	100	2000	3		0,09	3

Для сравнения скорости работы МПД с коротким преобразованным к квазициклическому СОК, используем алгоритм Берлекэмпа-Мэсси для декодирования БЧХ-кодов. Выбор этого алгоритма обусловлен тем, что из ряда известных алгоритмов он обладает минимальным количеством операций в конечном поле. В качестве аналога для используемых квазициклических СОК использовалась конструкция кодов БЧХ с близкими характеристиками (n, k, d_{min}) – (16, 11, 4). Из представленной в табл. 1 задержки декодирования данных $t_{rx-delay_{БЧХ}}$ видно, что полученные оценки декодирования МПД существенно превосходят аналогичные коды БЧХ. При этом вычислительная сложность БЧХ-кодов для МК с ростом длины кода существенно увеличивается и фак-

тически препятствует их реализации, в то время как для МПД требуется только увеличение порогов, размеров регистров и количества сумматоров по модулю 2.

Методика расчета $p_{npA2}(1)$ сигналограммы при использовании помехоустойчивого кодирования будет соответствовать алгоритму с переспросами, который описан выше, и результаты расчетов будут отличаться от приведенных за счет уменьшения l_{uA2} и l_{A2} в первой попытке передачи. В предложенных алгоритмах адаптации передача проверочной группы происходит в отдельной части кадра, что позволяет уменьшить влияние группирующихся ошибок на измерительные данные. В дальнейших расчетах для исключения вероятности неисправляемых $p_{ни}$ и исправляемых $p_{и}$ ошибок будет использоваться скорректированная вероятность ошибки $p_{ошкор}$, которая показывает $p_{ош}$ после применения помехоустойчивого кодирования. Для повторных попыток вероятность p_{npA2} доставки последовательности кадров длиной n_{lAx} будет определяться выражением

$$\begin{aligned}
 p_{npA2}(m, n_{l_{Ax}}) &= \left[p_{npA2}(1) + p_{ош}(l_{A2}) p_{npкорA2}(1) + \right. \\
 &+ p_{ош}(l_{A2}) p_{ошкор}(l_{A2}) p_{npкорA2}(1) + \dots + \\
 &+ p_{ош}(l_{A2}) (p_{ошкор}(l_{A2}))^{m-2} p_{npкорA2}(1) \left. \right]^{n_{l_{Ax}}} = \quad , \text{ при } m > 1 \\
 &= \left[p_{npA2}(1) + p_{ош}(l_{A2}) (1 - (p_{ошкор}(l_{A2}))^{m-1}) \right]^{n_{l_{Ax}}}
 \end{aligned}$$

где $p_{npкорA2}(1)$ – откорректированное значение $p_{npA2}(1)$ с учетом помехоустойчивого кодирования, которое определяется выражением

$$p_{npкорA2}(1) = (1 - p_{ошкор}(l_{A2})).$$

В состоянии $A2$ $Z_{A2}(m)$ для одной и двух попыток будет определяться аналогично алгоритму с переспросами с использованием выражения. Уменьшение Z_{A2} произойдет в алгоритме ДКПиПК после попытки с передачей корректирующей части (второй) и без учета неисправленных ошибок определится как

$$Z_{A2}(m, n_{l_{A2}}) = n_{l_{A2}} \left((l_{uA2} + l_{clA2}) + (l_{A2}) \left(p_{ош}(l_{uA2} + l_{clA2}) + \sum_{m=1}^{m-2} [p_{ошкор}(l_{A2})^m] \right) \right).$$

При построении графиков зависимости $E_{оши}(m)$ для алгоритмов, использующих помехоустойчивое кодирование, следует учитывать дополнительную временную задержку $t_{ix-delay}$, которая вносится кодером и уменьшает темп передачи информации. Для её учета в выражение (1) вводится понятие скорректированной скорости передачи. При кодовой скорости $R = 1/2$ произойдет уменьшение l_{uA2} и увеличение n_{lA2} в два раза, что следует учитывать при расчетах $p_{npA2}(m)$ и $E_{ошиA2}(m)$. Полученный с учетом приведенных выше рассуждений график $E_{оши}(m)$ для алгоритма ДКПиПК представлен на рис. 5.

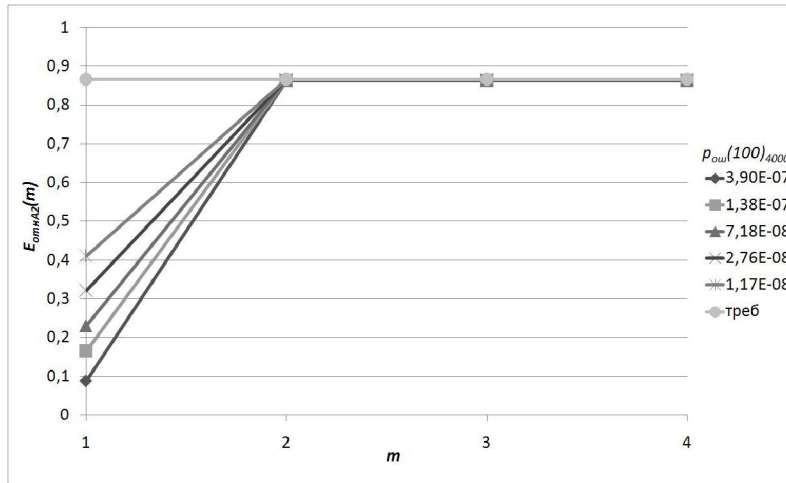


Рис. 5. Алгоритм ДКПиПК: зависимость $E_{omniA2}(m)$ при заданной $p_{oui}(100)$ при передаче сигналограммы с использованием кода с $d = 5$, $R = 1/2$ при $I = 6$

Для оценки результатов внедрения и работы алгоритма ДКиПК воспользуемся методикой, описанной выше, с учетом замены значений p_{oui} на $p_{ошкор}$. График зависимости $E_{omniA2}(m)$ для алгоритма ДКиПК показан на рис. 6.

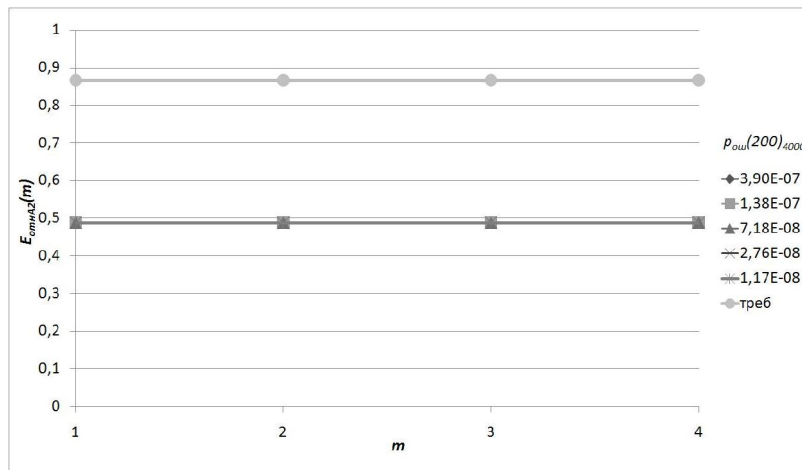


Рис. 6. Алгоритм ДКиПК: зависимость $E_{omniA2}(m)$ при заданной $p_{oui}(200)$ при передаче сигналограммы с использованием кода с $d = 5$, $R = 1/2$ при $I = 6$

Из представленного на рис. 5 графика можно сделать вывод, что при использовании алгоритма ДКПиПК в состоянии $A2$ обеспечивается E_{omni} доставки сигналограммы в соответствии с требованиями к разрабатываемой СПД АСКГД, так как в кадрах исправляются все ошибки за счет совместного использования помехоустойчивого кодирования и повторной передачи исход-

ного кадра. Из представленного на рис. 6 графика можно сделать вывод, что при использовании алгоритма ДКиПК не обеспечиваются требования к $E_{отн}$, что объясняется большим размером $l_{кодA2}$ при использовании кода с $R = 1/2$, но его применение возможно при использовании в СПД АСКГД медленных линий связи (с высокой задержкой передачи данных), например, спутниковых каналов с постоянной вероятностью битовых ошибок, так как вероятность доставки после первой попытки в нем выше, также при его использовании происходит снижение задержки в темпе поступления сигналограмм.

Заключение

На базе проведенных исследований и работ построена и внедрена на действующем предприятии автоматизированная система контроля горного давления. Предложены алгоритмы адаптации параметров СПД и ПИО к изменяющемуся состоянию канала связи, включающие в себя помехоустойчивое кодирование измерительных данных.

Библиографические ссылки

1. *Контроль* состояния массива горных пород удароопасного месторождения сейсмоакустическим методом / И. Ю. Рассказов [и др.] // Эффективные способы добычи и переработки полезных ископаемых Дальневосточного региона. Владивосток, 1998.
2. *Mendecki A. J.* Seismic Monitoring in Mines. London, 1997.
3. *Акустический* измерительно-вычислительный комплекс для геомеханического мониторинга массива пород при ведении горных работ / Г. А. Калинов [и др.] // Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геологическая акустика. сб. тр. XVI сессии Российского акустического общества. Т. 1. М., 2005.
4. *Совершенствование* технических и программно-методических средств геоакустического мониторинга удароопасного массива горных пород / И. Ю. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 6.
5. *Совершенствование* средств и методов геоакустики для геомеханического мониторинга массива пород при ведении горных работ / Г. А. Калинов [и др.] // Геомеханика в горном деле: доклады международной конференции. Екатеринбург, 2005.
6. *Совершенствование* технических и программно-методических средств геоакустического мониторинга удароопасного массива горных пород / И. Ю. Рассказов, Г. А. Калинов, Д. С. Мигунов, Д. А. Куликов, К. О. Харитонов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 6.
7. *Kulikov D. A.* Data Communication and noiseproof code decoding in geomechanical monitoring system / Kulikov D.A., Chye En Un // Modern Materials and Technologies 2007: Materials of international VIII Russia-China Symposium: two volumes. Khabarovsk: Pacific National University, 2007. V. 2.