

24. *Woulfe M., Manzke M.* Towards a field- programmable physics processor (FP3). Interaction, Simulation and Graphics Lab (ISG), Department of Computer Science, Trinity College Dublin. The Eurographics Association 2006. – 7 p.
25. *Zhou Y. J., Mei T. X.* FPGA BASED REAL TIME SIMULATION FOR ELECTRICAL MACHINES. School of Electronic and Electrical Engineering, The University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, UK. 2005. – 6 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Белевцев.

Гузик Вячеслав Филиппович – Южный федеральный университет; e-mail: vfguzik@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371550; кафедра вычислительной техники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Беспалов Дмитрий Анатольевич – e-mail: bda82@mail.ru; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

Guzik Vyacheslav Filippovich – Southern Federal University; e-mail: vfguzik@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371550; the department of computer engineering; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Bespalov Dmitry Anatolievich – e-mail: bda82@mail.ru; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 543.421:621.38

А.В. Вовна, А.А. Зори

СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПОДСИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ПЫЛЕГАЗОВОЙ СМЕСИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Вследствие интенсификации технологического процесса добычи угля при ведении работ в горных выработках резко возрастают пылеобразование и газоносность шахт, что приводит к повышению взрывоопасности пылегазовой смеси. Комплексное оснащение шахт системой азрогазовой защиты не обеспечивает достаточный уровень безопасности. Отсутствие быстродействующих высокоточных измерителей концентрации пыли ограничивает функции достоверного диспетчерского контроля по пылегазовой обстановке в рудничной атмосфере. Работа направлена на постановку требований и разработку подсистемы контроля параметров взрывоопасности пылегазовой смеси в рудничной атмосфере угольных шахт в составе систем диспетчерского контроля. На основании проведенных исследований предложенной математической модели синтезирована структура измерительной подсистемы и сформулированы требования к ее блокам. Ведение непрерывного контроля концентрации пыли позволило использовать подсистему в комплексе УТАС, а объединение в ней функций измерения влажности и концентрации метана в выработках делает возможность оценить в режиме реального времени вероятность наступления взрывоопасной ситуации в шахтах, что до настоящего времени не выполняется в реальных системах. На основе комплексного показателя определены вероятностные характеристики взрывоопасности пылегазовой смеси: при наличии 1^{об.}% метана концентрационный нижний предел взрывчатости угольной пыли снижается в два раза, а при 2^{об.}% – в четыре. Из анализа требований, предъявляемых к измерительной подсистеме концентрации метана и пыли в угольных шахтах, определены ее базисные функции. Базисные функции аппаратных средств подсистемы и учет связей между ними позволили объединить их в единую систему, имеющую статус подсистемы комплекса УТАС. Выполнен структурно-алгоритмический синтез измерительной подсистемы, описаны структурные блоки аппаратных средств, разработаны и реализованы алгоритмы и подпрограммы их функционирования.

Измеритель; подсистема; концентрация; метан; пыль; порог взрывчатости.

A.V. Vovna, A.A. Zori

**STRUCTURAL AND ALGORITHMIC ORGANIZATION CONTROL
SUBSYSTEM PARAMETERS EX-PLOSIVE DUST-GAS MIXTURE
IN COAL MINES**

The intensification of the coal mining process in the mine workings leads to a sharp dust and gas content. This implies an increase of the dust-gas mixture explosive. Air and gas protection system complex equipment of the mines doesn't provide a sufficient safety level. Lack of the high-speed high-precision dust concentration measuring instruments limit reliable functions of the dust-gas conditions supervisory control in the mine atmosphere. The work is aimed on the requirements setting and the control subsystem parameters dust-gas mixture explosion development for the mine atmosphere in the coal mines, which is included in the supervisory control systems. The structure of the measurement subsystem has been synthesized and the requirements for its units have been formulated, which are based on the proposed mathematical model studies. Maintaining of the dust concentration continuous monitoring allowed to use proposed subsystem in a complex UTAS. Combining measuring functions of the humidity and methane concentration monitoring in the workings makes possible to estimate the on-line probability of the explosive situation occurrence in the mines, that wasn't carried out in the present system to date. The probabilistic characteristics of explosive dust-gas mixture has been defined on the basis of the complex index: the presence 1 vol.% methane concentration lower limit of explosiveness of coal dust is reduced by half, and at 2 vol.% – four. Basis functions hardware subsystems and the links between them allowed to combine them into a single system, which has the status subsystem complex UTAS. Structural and algorithmic synthesis measuring subsystem has been made, the building blocks of hardware has been described, algorithms and routines of their functioning has been developed and implemented. Measurer; subsystem; concentration; methane; dust; threshold explosiveness.

Актуальность проблемы, постановка цели и задач исследований. Вследствие интенсификации технологического процесса добычи угля при ведении работ в горных выработках резко возрастают пылеобразование и газоносность шахт, что приводит к повышению взрывоопасности пылегазовой смеси. Комплексное оснащение шахт системой УТАС [1] не обеспечивает достаточный уровень безопасности. Отсутствие быстродействующих высокоточных измерителей концентрации пыли ограничивает функции достоверного диспетчерского контроля по пылегазовой обстановке в рудничной атмосфере [2–5]. Кроме того, дефицит оперативных данных по концентрации пыли не позволяет определить достоверные вероятностные характеристики ее взрывчатости в смеси с метаном при изменении влажности и скорости воздушного потока, что увеличивает риск возникновения взрывоопасной ситуации в угольных шахтах.

Целью работы является постановка требований и разработка подсистемы контроля параметров взрывоопасности пылегазовой смеси в рудничной атмосфере угольных шахт для системы диспетчерского контроля УТАС. Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Усовершенствовать и исследовать математическую модель оценки нижнего порога взрывчатости пылегазовой смеси с учетом комплекса дестабилизирующих факторов.
2. Установить требования к измерительной подсистеме концентрации метана и пыли в угольных шахтах и сформулировать ее базисные функции.
3. Выполнить структурно-алгоритмическую организацию измерительной подсистемы концентрации метана и пыли в рудничной атмосфере шахт.

Математическая модель оценки нижнего порога взрывчатости пылегазовой смеси. Метан, присутствующий в составе рудничной атмосферы, оказывает существенное влияние на нижний порог взрывчатости (НПВ) угольной пыли. Установлено [6, 7], что добавление метана в пылевоздушную смесь углей с выходом летучих от 4 до 22 % резко сокращает величину минимальной энергии воспламе-

нения пылевоздушной смеси и, соответственно, минимальную взрывчатую концентрацию пыли. При увеличении концентрации метана от 0,5 до 2 % НПВ угольной пыли линейно снижается [8, 9]. Для практики пылегазового контроля актуальным является вопрос о допустимом содержании взрывоопасных газов и взвешенной пыли в случае одновременного их присутствия. Ключевым решением данного вопроса является запас надежности контроля взрывоопасности рудничной атмосферы, под которым подразумевают отношение $K = A_{НПВ} / A$ величины НПВ компонента $A_{НПВ}$ к допустимой величине его концентрации в воздухе A [10, 11]. Так, Правилами безопасности регламентируются предельные концентрации метана, при которых стационарная автоматическая аппаратура должна производить отключение электроэнергии. Расчет коэффициента запаса производится при НПВ метана, величина которого равна 5^{об.%}.

Получила дальнейшее развитие математическая модель [10, 12–14], позволяющая установить концентрационный НПВ взвешенной угольной пыли $C_{нНПВ}$ в воздухе рудничной атмосферы в зависимости от зольности A^d , выхода летучих компонент V_C^{daf} , влажности воздуха $\gamma_{вл}$ и концентрации метана X_{CH_4} при дисперсности частиц $D = (1 \div 10)$ мкм, на основе выражения:

$$C_{нНПВ}(V_C^{daf}, A^d, \gamma_{вл}, X_{CH_4}) = \left(\delta_{взв}(V_C^{daf}, A^d) + \zeta \cdot \gamma_{вл}^\beta \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{X_{CH_4}}{X_{CH_4НПВ} + \vartheta \cdot \gamma_{вл}^\alpha} \right)^m \right)^{1/m}, \quad (1)$$

где $\delta_{взв}(V_C^{daf}, A^d)$ – НПВ взвешенной пыли в сухом воздухе, г/м³; $m = 0,66512 - 0,12818 \cdot \left(X_{CH_4} / (X_{CH_4НПВ} + \vartheta \cdot \gamma_{вл}^\alpha) \right)$ – показатель степени, определяемый опытным путем при $\alpha = 2,34$; ζ – коэффициент повышения НПВ (в зависимости от свойств угля изменяется в пределах от 0,357 до 0,755); $\alpha = 1,65$ – показатель степени, значение которого подбирается опытным путем; $X_{CH_4НПВ} = 4$ ^{об.%} – НПВ метана в сухом воздухе, %; ϑ – согласующий коэффициент повышения НПВ метана, значение которого составляет $\vartheta = 0,009$, %/ (г/м³).

Полученная модель (1) нашла подтверждение при проведении экспериментальных исследований МакНИИ в условиях шахт Донбасса [15]. При анализе результатов, полученных на основе (1) установлено, что наличие влаги в воздухе способствует повышению порога взрывчатости пылевоздушной смеси. При наличии метана в выработке порог взрывчатости пыли снижается пропорционально объемному его содержанию в пылевоздушной смеси [10, 12–14]. Так, при отсутствии метана, предел взрывчатости взвешенной пыли составляет более 40 г/м³, а при максимально неблагоприятных условиях (высокая концентрация метана $X_{CH_4} = 2$ ^{об.%}, выход летучих V_C^{daf} более 41 %, низкая зольность A^d менее 10 % и влажность) предел взрывчатости угольной пыли составляет 3 г/м³.

Структурно-алгоритмический синтез измерительной подсистемы. На основании проведенных исследований предложенной математической модели (1) синтезирована структура измерительной подсистемы и сформулированы требования к ее блокам. Ведение непрерывного контроля концентрации пыли позволило использовать ее в качестве подсистемы в комплексе УТАС [1], а объединение в нем функций измерения влажности и концентрации метана в выработках позволило в режиме реального времени оценивать вероятность наступления взрывоопасной ситуации в шахтах. На основании требований, предъявляемых к измерительной подсистеме, определены ее базисные функции [16–20]:

- 1) измерение массовой концентрации взвешенной пыли $C_{П}$ в шахтах;
- 2) обеспечение режимов работы светоизлучающих диодов с помощью аппаратно-программного способа управления драйверами;

3) учет и компенсация влияния основных дестабилизирующих факторов – температуры и дисперсного состава пыли, изменение которые обуславливает внесение дополнительной составляющей погрешности в результаты измерений;

4) преобразование величины информативных оптических потоков, прошедших через оптические каналы, обработка и приведение к унифицированным выходным сигналам напряжений для их последующей цифровой обработки;

5) учет запыленности оптических элементов двулучевого измерителя концентрации угольной пыли и коррекция результатов измерений;

6) цифровая обработка информационных сигналов, при выполнении которой определяются параметры функции распределения частиц пыли по дисперсности и массовая концентрация угольной пыли в измеряемом объеме анализируемой пробы в режиме реального времени;

7) измерение объемной концентрации метана C_{CH_4} и абсолютной влажности воздуха γ_B в выработках угольных шахт;

8) расчет концентрационных пределов взрывчатости угольной пыли на основе измеренных значений параметров взрывоопасной пылегазовой смеси;

9) хранение и документирование информации о динамических изменениях параметров рудничной атмосферы для их последующей оценки и определения вероятности наступления взрывоопасной ситуации в угольной шахте;

10) диагностика и инициализация аппаратных средств;

11) прием и передача информации от измерительных каналов по телекоммуникационной линии связи в диспетчерский пункт УТАС;

12) регистрация и отображение текущей информации о параметрах рудничной атмосферы угольной шахт.

Измеритель запыленности выполняет непрерывный контроль концентрации взвешенной угольной пыли (функция 1) с помощью двулучевого оптического метода в диапазоне от 0 до 3 г/м³ при величине абсолютной погрешности измерений не более 50 мг/м³. При прохождении через закрытый и открытый оптические каналы зондирующее излучение от СИД₁ и СИД₂ поступает в объективы фотодиодов ФД₁ и ФД₂. Режимы работы СИД задаются соответствующими драйверами управления, которые поочередно включают их с помощью сигналов управления СУ₁ и СУ₂ от микроконтроллера, тем самым реализуя аппаратно-программный способ управления СИД (функция 2). Информационные сигналы с выходов фотоприемников ФД₁ и ФД₂ закрытого и открытого оптических каналов поступают на входы аналогового блока преобразования и обработки сигналов, в котором происходит аппаратная температурная компенсация при коммутации двух каналов с различными длинами волн излучений (функция 3). В аналоговом блоке также происходит масштабирование и приведение сигналов к унифицированному виду выходного напряжения от 0 до 5 В (функция 4) при изменении концентрации угольной пыли в ООК от 0 до 3 г/м³ для последующей их цифровой обработки согласно алгоритму работы измерителя концентрации взвешенной угольной пыли.

Предложенная конструкция оптоэлектронного блока измерителя включает дополнительный контрольный фотоприемник ФД₃, который обеспечивает измерение степени запыленности смотровых стекол, выполненных из двух плоских стекол и установленных под углом 90°. Преобразованный сигнал с выхода ФД₃ масштабируется и поступает через мультиплексор аналоговых сигналов на вход АЦП для последующей цифровой обработки, которая предусматривает учет запыленности (функция 5) стекол измерителя.

Цифровой блок обработки информационных сигналов выполняет:

- ♦ преобразование унифицированных сигналов выходных напряжений двух каналов измерителя с различными длинами волн зондирующего излучения с выходов аналогового блока в цифровые коды;

- ◆ сравнение экспериментальных и теоретических значений коэффициентов спектральной прозрачности методом покоординатного спуска, который реализован в алгоритме обработки экспериментальных данных, в результате чего определяются коэффициенты функции распределения частиц пыли;
- ◆ построение функции распределения частиц угольной пыли в режиме реального времени (функция 6) и на ее основе вычисление значения массовой концентрации угольной пыли, при этом реализован учет влияния изменения дисперсности пыли на результаты измерения ее концентрации (функция 3) в измеряемом объеме пылевого аэрозоля.

В микропроцессорной блоке измерителя [21] при определении порога взрывчатости пылегазовой смеси предусмотрено измерение объемной концентрации метана C_{CH_4} и абсолютной влажности воздуха γ_B в выработках угольных шахт (функция 7). Измерения концентрации метана выполняется в диапазоне от 0 до 4^{об}% с абсолютной погрешностью измерения не более $\pm 0,2^{об}\%$ [22–25]. Измерения относительной влажности воздуха выполняется в диапазоне от 0 до 100 % при изменении температуры от +5 до +35 °С и давления – от 87,8 до 119,7 кПа.

Разработанная математическая модель на основе многопараметрического функционала (1) позволила установить нижний предел взрывчатости угольной пыли (функция 8) от изменения концентрации метана для различных типов угольных пластов с заданными параметрами выхода летучих компонент V_C^{daf} и зольности A^d на основе текущих экспериментальных значений измеряемых параметров компонент пылегазовой смеси.

Алгоритмом работы измерителя концентрации угольной пыли предусматривается хранение и документирование экспериментальной информации о параметрах атмосферы угольной шахты (функция 9) для следующих целей:

- ◆ установление динамики изменения параметров атмосферы во времени и проведение интерполяционного расчета вероятностных характеристик наступления взрывоопасной ситуации в рудничной атмосфере угольных шахт;
- ◆ определение среднесменных статистических показателей вредности труда горнорабочих и сравнение их с предельно-допустимыми концентрациями параметров рудничной атмосферы для выработки последующих мер по обеспечению техники безопасности в шахтах.

Измеритель обеспечивает функции самодиагностики и инициализации аппаратных средств (функция 10). После запуска и инициализации на протяжении всего времени его работы в автоматическом режиме непрерывно выполняется их диагностика и, при необходимости, генерируются соответствующие коды ошибок, связанных с отказами или неисправностями каких-либо узлов для последующей передачи по каналам связи в диспетчерский пункт управления технологическими процессами. Прием и передача информации, полученной от измерительных каналов и блока диагностики (функция 11) каждого из производственных участков осуществляется по телекоммуникационной линии связи в соответствии с протоколом диспетчерского пункта УТАС. Регистрацию и отображение текущей информации о значениях отдельных параметров рудничной атмосферы (функция 12) осуществляют в режиме реального времени с помощью цифровой визуализированной индикации в виде временных диаграмм, графиков функций и численных значений измеряемых параметров.

Поставленные требования к базисным функциям аппаратных средств измерителя концентрации газов и пыли в рудничной атмосфере, а также учет их связей позволили объединить их в единую подсистему, структурная схема которой представлена на рис. 1, где приведены следующие блоки аппаратных средств:

- ◆ подсистема измерения концентрации в диапазоне от 0 до 3 г/м³ и дисперсности пыли, которая состоит из блока драйверов управления режимами работы оптоэлектронной части двулучевого измерителя (2) и аналогового блока преобразования, температурной компенсации и масштабирования экспериментальной информации (3), оптоэлектронного блока измерения запыленности (4) оптических элементов пылемера, выходной сигнал с которого преобразуется к унифицированному виду в соответствующем аналоговом блоке (5);
- ◆ подсистема измерения объемной концентрации метана (6) в диапазоне от 0 до 4 %;
- ◆ подсистема измерения температуры и влажности рудничной атмосферы (7) в диапазоне от 0 до 100 % при изменении температуры окружающей среды от +5 до +35°С;
- ◆ цифровой вычислительный блок, состоящий из микроконтроллера МК, интерфейса связи (13) с системой аэрогазовой защиты (АГЗ) УТАС (17) по цифровому протоколу передачи данных и блока индикации (16).

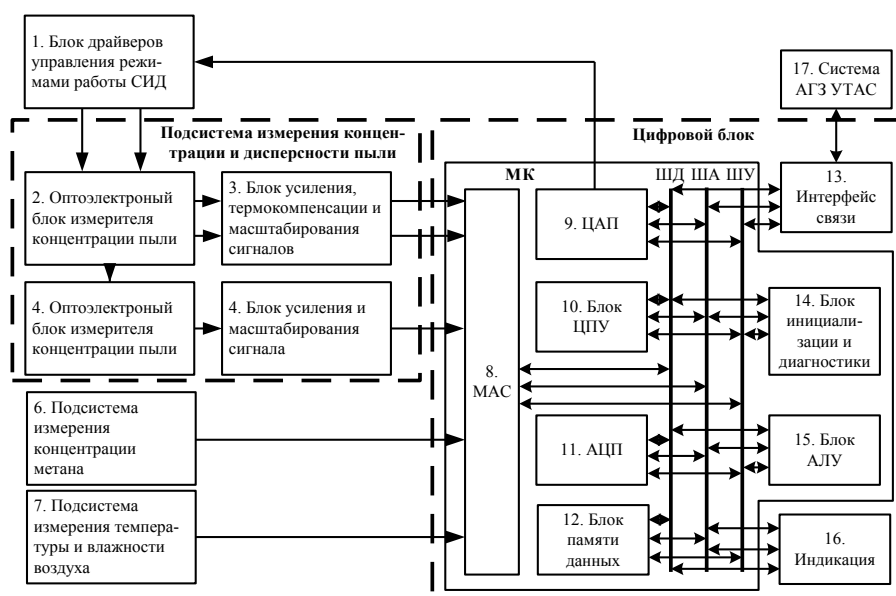


Рис. 1. Структурная схема измерительной подсистемы концентрации метана и пыли в рудничной атмосфере угольных шахт

Основу цифровой подсистемы измерителя концентрации угольной пыли составляет МК с функциями управления работой объединенными подсистемами, вычисления, обработки, передачи информации и индикации. МК содержит следующие блоки: мультиплексор аналоговых сигналов МАС (8), цифроаналоговый преобразователь ЦАП (9), центральное процессорное устройство ЦПУ (10), аналого-цифровой преобразователь АЦП (11), память данных (12), блок инициализации и диагностики (14) и арифметико-логическое устройство АЛУ (15).

Блок ЦПУ (10) предназначен для детектирования команд, расположенных в памяти программ и управления работой микроконтроллера, выработка команд посредством цифро-аналогового преобразования для управления блоком драйверов СИД двулучевого измерителя концентрации угольной пыли. ЦПУ реализует

управление (ШУ) шинами адреса (ША) памяти программ, данных (ШД), работает совместно с блоком АЛУ (15) для выполнения арифметических и логических операций. Для работы с памятью данных (12) предназначено АЛУ (15), выполняющее арифметические, логические операции и управляет флагами (битами) состояния при выполнении каких-либо команд в зависимости от полученного результата.

Блок АЦП (11) преобразует информационные унифицированные сигналы напряжений с выходов измерительных каналов концентрации пыли, метана, температуры, влажности воздуха и запыленности оптических элементов в соответствующие цифровые коды методом последовательного приближения для последующих вычислений согласно разработанному алгоритму работы измерителя.

Для вычисления концентрационных пределов взрывчатости угольной пыли в измеритель введены подсистемы измерения концентрации метана (6) и влажности рудничной атмосферы угольных шахт (7). На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложенной математической модели расчета нижнего порога взрывчатости в зависимости от концентрации метана в пылегазовой смеси рудничной атмосферы к подсистеме измерения объемной концентрации метана поставлены следующие требования:

- ◆ диапазон изменения выходного сигнала напряжения, В от 0 до 5;
- ◆ диапазон измерения объемной концентрации, $^{00}\%$ от 0 до 4;
- ◆ быстродействие измерительного канала, с не более 0,8;
- ◆ рабочий диапазон изменения температуры рудничной атмосферы, $^{\circ}\text{C}$ от 0 до +50;

В состав подсистемы измерения концентрации метана входят аппаратно-программные средства учета и компенсации температурного дрейфа выходных сигналов оптического измерителя [23–25], а также коррекция результатов измерений при внесении дополнительной погрешности вследствие запыленности первичного измерительного преобразователя [22].

После получения необходимой информации от подсистем измерения концентрации метана, влажности и температуры воздуха в МК рассчитывается НПВ угольной пыли в данных условиях и результат сравнивается с измеренным экспериментально значением. Динамика изменений результатов измерений и расчетов накапливаются в памяти данных и при использовании соответствующего алгоритма обработки массива информационных данных делаются выводы о состоянии безопасности работы в выработке угольной шахты. По завершению каждого цикла измерений и обработки данных, результаты передаются по каналу связи в диспетчерский пункт (ДП) системы азрогазовой защиты УТАС, где принимаются соответствующие меры по дальнейшей работе электрических горных механизмов в выработке.

Заключение. На основании проведенных исследований предложенной модели синтезирована структура измерительной подсистемы и сформулированы требования к ее блокам. Ведение непрерывного контроля концентрации пыли позволило использовать подсистему в комплексе УТАС, а объединение в ней функций измерения влажности и концентрации метана в выработках делает возможность оценить в режиме реального времени вероятность наступления взрывоопасной ситуации в шахтах, что в существующих системах до настоящего времени не выполняется.

На основе комплексного показателя-функционала (1) определены вероятностные характеристики взрывчатости пылегазовой смеси установлено, что при наличии $1^{00}\%$ метана концентрационный нижний предел взрывчатости угольной пыли снижается в два раза, а при $2^{00}\%$ – в четыре, в существующих системах снижение данного показателя практически не учитывалось из-за отсутствия измерительного контроля концентрации пыли в режиме реального времени.

На основании полученных результатов разработаны технические требования к измерителю концентрации пыли в рудничной атмосфере угольных шахт. Из анализа предъявляемых требований определены базисные функции подсистемы, которые с учетом всех связей между ними позволили объединить их в единую систему, имеющую статус подсистемы комплекса УТАС аэрогазовой защиты шахты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственное предприятие “Петровский завод угольного машиностроения”: системы комплексной безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://itras.com.ua/index.php?id=16076&show=4nalbum&do=showgall&gid=28135> (дата обращения: 02.04.2015).
2. *Hartman H. L.* Mine ventilation and air conditioning. – 3rd ed. – NY.: John Wiley & Sons, 2012. – 752 p.
3. *Eckhoff Rolf K.* Dust explosions in the process industries – identification, assessment and control of dust hazards. – 3rd ed. – Gulf Professional Publishing, 2003. – 719 p.
4. Griffith W.C. Dust explosions // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1978. – Vol. 10. – P. 93-105.
5. *Tasneem Abbasi, Abbasi S.A.* Dust explosions – cases, causes, consequences, and control // *Journal of hazardous materials*. – 2007. – Vol. 140, is. 1–2. – P. 7-44.
6. *Петрухин П.М., Гродель Г.С. Жильев Н.И.* Борьба с угольной и породной пылью в шахтах. – 2-е изд. перераб. и доп. – М: Недра, 1981. – 271 с.
7. *Du Plessis J.J.L., Bryden D.J.* Systems to limit coal dust and methane explosions in coal mines // *Safety in Mines Research Advisory Committee*. – 1997. – Vol. 322. – P. 1-50.
8. *Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И.* Рудничная аэрология. – М.: Недра, 1978. – 440 с.
9. *Wolinski M.* Hybrid detonations in oats dust clouds in methane-air mixtures // *Combustion Science and Technology*. – 1996. – Vol. 120, is. 1-6. – P. 39–53.
10. *Сенкус В.В., Стефанюк Б.М., Лукин К.Д.* Коэффициент взрывобезопасности угольной шахты // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – № 10. – С. 23–27.
11. Landman G.V.R. Ignition behaviour of hybrid mixtures of coal dust, methane and air // *Journal – South African institute of mining and metallurgy*. – 1995. – P. 45-50.
12. *Вовна О.В., Зорі А.А., Соломічев Р.І.* Комплексне врахування впливу компонент рудничної атмосфери при розрахунку нижньої концентраційної межі вибуховості вугільного пилу // *Сборник тезисов докладов Первой всеукраинской научно-технической конференции «Современные тенденции развития приборостроения»*. – Луганск, 2012. – С. 272-273.
13. *Соломічев Р.І., Вовна О.В., Зорі А.А.* Розробка двопробеневого вимірювача концентрації та дисперсності вугільного пилу з компенсацією температурного дрейфу // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – Вінниця, 2014. – № 5 (116). – С. 36-41.
14. *Соломічев Р.І., Вовна О.В., Зорі А.А.* Розробка та обґрунтування структури вимірювальної системи контролю вибухонебезпечних пило-газових сумішей в шахтному виробітку // *Вісник НТУ «ХП»*. Збірник наукових праць «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – Харків, 2014. – № 9 (1062). – С. 154-163.
15. *Нецпляев М.И.* Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. – М: Недра, 1992. – 298 с.
16. *Вовна А.В.* Компьютеризированная информационно-измерительная система контроля концентрации метана в угольных шахтах: дис. ... канд. техн. наук. – Донецк, 2009. – 200 с.
17. *Sanguo Li.* Optical fiber gas sensor for remote detection of CH₄ gas in underground mines // *Proceedings of the society for photo-instrumentation engineers*. – 2005. – Vol. 5770. – P. 205-212.
18. *Jia-Sheng Ni.* Fiber methane gas sensor and its application in methane outburst prediction in coal mine // *Journal of electronic science and technology of China*. – 2008. – Vol. 6, no. 4. – P. 373-376.
19. *Cheng X., Cao M, Collier M.* An on-line detection system for coal mine dust // *Intelligent control and automation // WCICA, 7th World Congress on*. – 2008. – P. 4166-4171.

20. *Вовна А., Зори А., Хламов М.* Методы и средства измерения концентрации газовых компонент. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 244 с.
21. *Соломічев Р.І., Вовна О.В.* Алгоритмічно-структурний синтез системи контролю вибухонебезпечних газових сумішей рудничної атмосфери // Збірник наукових праць XIV міжнародної науково-технічної конференції аспірантів і студентів «Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих». – Донецьк: ДонНТУ, 2014. – С. 313-317.
22. *Вовна О.В., Зорі А.А.* Розробка та дослідження швидкодіючого вимірювача концентрації метану інваріантного до запилення рудничної атмосфери // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Донецьк, 2012. – № 22 (200). – С. 143-150.
23. *Вовна А.В., Зори А.А.* Разработка и исследование экспериментального образца измерителя концентрации метана для угольных шахт // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 171-177.
24. *Вовна А.В., Зори А.А.* Разработка и исследование радиоэлектронного оптического измерителя концентрации метана // Материалы 23-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013). – Севастополь, 2013. – С. 984-985.
25. *Вовна А.В., Зори А.А.* Оптический измеритель концентрации метана с компенсацией температурного дрейфа // Материалы міжнародної науково-технічної конференції «Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення». – Севастополь, 2013. – С. 142-144.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор П.Г. Михайлов.

Вовна Александр Владимирович – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»; e-mail: Vovna_Alex@ukr.net; 85300, г. Красноармейск, пл. Шибанкова, 2, Украина; кафедра электронной техники; к.т.н.; доцент.

Зори Анатолий Анатолиевич – e-mail: zori@kita.dgtu.donetsk.ua; кафедра электронной техники; заведующий кафедрой; д.т.н.; профессор.

Vovna Aleksander Vladimirovich – State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”; e-mail: Vovna_Alex@ukr.net; 2, Shibankov area, Krasnoarmejsk, 85300, Ukraine; the department of electronic technics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Zori Anatolii Anatolievich – e-mail: zori@kita.dgtu.donetsk.ua; the department of electronic technics; the head of department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 519.688

О.В. Шаповалов, А.Е. Андреев, С.А. Фоменков

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ПРОГРАММ ДЛЯ СИСТЕМ С ОБЩЕЙ ПАМЯТЬЮ

Рассматривается вопрос автоматизации разработки параллельных программ для систем с общей памятью. Целью данной работы является разработка программного обеспечения, которое предоставит возможность программисту сравнить скорость работы и максимально эффективно использовать различные технологии параллельного программирования применительно к конкретной решаемой задаче. Для сокращения времени разработки предлагается единый интерфейс для работы с технологиями OpenMP, CilkPlus, Intel TBB, PPL, BoostThreads, данный интерфейс используется для автоматического распараллеливания последовательного кода для указанных технологий. Для повышения эффективности распараллеливания предлагается метод, когда для параллельного выполнения одного и того же участка программы могут использоваться несколько технологий параллельного программирования, выбор между которыми происходит на этапе выполнения по разрабо-