

УДК 681.5.013

О.Ю. Чередникова, канд. техн. наук, доц.,  
Донецкий национальный технический университет  
ola@cs.dgtu.donetsk.ua

## Исследование характеристик блока наблюдения оптимального по быстродействию управления объектом со знакопеременной характеристикой методами моделирования

Рассмотрен синтез оптимального по быстродействию управления объектом со знакопеременной характеристикой – выемочным участком угольных шахт. В управлении предложено использовать специально вычисляемую промежуточную однополярную переменную, т.е. координату, не имеющую знакопеременной характеристики, расчет которой происходит в блоке наблюдения. Методами математического моделирования определены оптимальные характеристики блока наблюдения и показана работоспособность и эффективность предложенных алгоритмов.

**Ключевые слова:** фазовая плоскость, оптимальное управление, знакопеременная характеристика объекта, блок наблюдения, выемочный участок, режим проветривания.

### Введение

Ряд процессов в вентиляционной системе рудников и угольных шахт относятся к классу объектов со знакопеременной характеристикой [1], обусловленной наличием правых нулей в операторе объекта. В промышленных процессах с правыми нулями управляющий параметр распространяется на выход объекта по двум каналам с различными знаками и в зависимости от доли положительной и отрицательной части управляющего параметра максимальный выброс выходного сигнала при изменении управляющего параметра происходит либо в положительную, либо в отрицательную область. Это свойство и значительная инерционность рассматриваемых объектов ухудшает регулируемость процессов и предъявляет достаточно высокие требования ко времени регулирования.

### Описание

В качестве процесса со знакопеременной характеристикой рассмотрена аэрогазодинамика вентиляционной системы добычного участка угольных шахт при отработке заданного режима проветривания участка (рис.1, 2) в системе диспетчерского управления (рис.3).

Газовоздушная смесь на добычном участке (рис.1) распространяется по двум параллельным каналам. Большая часть газовоздушного потока движется по откаточному штреку, лаве и вентиляционному штреку, обогащаясь метаном в лаве. Меньшая доля воздуха – так называемые утечки воздуха – омывает большие пористые пустоты, образованные добытым углем, обогащаясь метаном отбитого угля и разгруженных верхних угольных пластов – так называемых спутников разрабатываемого пласта. При этом в силу мало-

сти утечек через пустоты, образованные добытым углем, концентрация метана в них доходит до 100%, что обуславливает большое влияние дебита утечек воздуха через эту зону на выходную концентрацию метана.

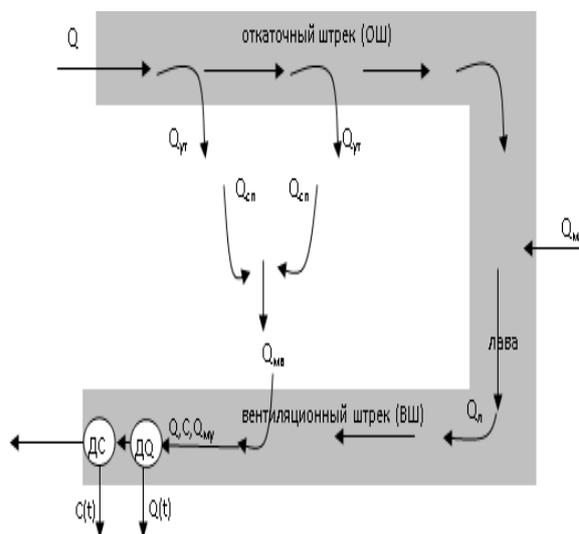


Рисунок 1 - Обобщенная схема движения газовоздушной смеси в выработках и выработанном пространстве выемочного участка:

$Q$  – дебит воздуха на участке;  $C$  – концентрация метана в исходящей струе участка;  $Q_{сп}$  – дебит метана из спутника;  $Q_{мв}$  – общий дебит метана из выработанного пространства;  $Q_{му}$  – общий дебит метана в исходящей струе участка;  $Q_{мл}$  – дебит метана из лавы;  $Q_{ут}$  – утечки воздуха в выработанное пространство; ДС, ДQ – датчики соответственно концентрации метана и расхода воздуха.

Большие объемы пористой среды, омываемой утечками, проявляются в значительной дли-

тельности переходных процессов по концентрации метана в утечках воздуха, а, следовательно, и в изменении содержания метана в воздушном потоке на выходе участка. Пример графиков переходного процесса при изменении режима проветривания на участке шахты «Мушкетовская-Вертикальная» показан на рис.2.

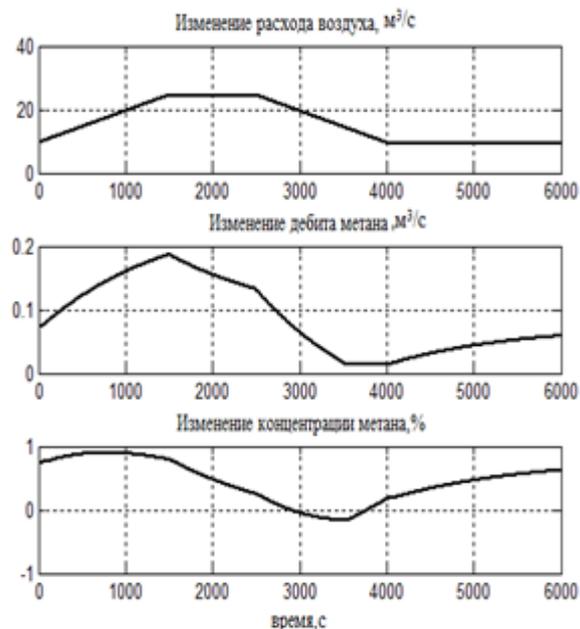


Рисунок 2 – Графики переходных аэрогазодинамических процессов на участке при изменении режима проветривания

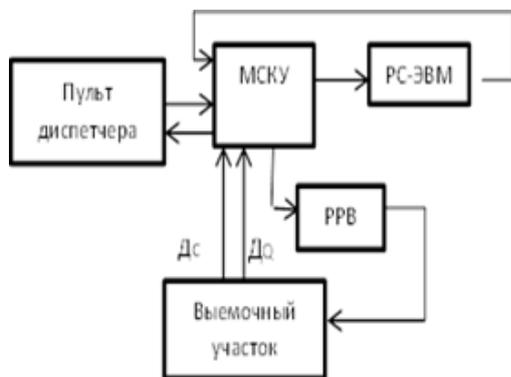


Рисунок 3 – Структура системы диспетчерского управления состоянием рудничной атмосферы выемочного участка угольных шахт: МСКУ – микроконтроллерная система контроля и управления; РРВ – регулятор расхода воздуха

При положительном приращении управляющего параметра на участке – расхода воздуха – на выходе участка в первый момент происходит положительный выброс концентрации метана относительно исходного уровня. Снижение доли метана в выходном потоке воздуха происходит только по прошествии достаточно продолжитель-

ного времени, связанного со временем установления нового значения средней концентрации метана в пустотах. В силу этого время установления стационарной зависимости между воздухом и содержанием метана может достигать нескольких часов [2].

В реальных производственных условиях по правилам безопасности регулирование проветривания участка выполняется только периодически при отсутствии на участке производственных процессов по добыче угля. С учетом значительной инерционности процессов в объекте наиболее эффективным средством решения задачи установления требуемого режима проветривания является реализация оптимальной системы управления по газу (рис.3), позволяющей автоматически обеспечивать отработку расчетного режима вентиляции рабочего пространства участка за минимально возможное время. При этом диспетчером с помощью пульта управления задается желаемый режим проветривания, который передается в компьютер посредством устройства связи с объектом (МСКУ). Алгоритм управления реализуется посредством программного обеспечения в РС-ЭВМ и с использованием МСКУ автоматически осуществляется регулирование режима вентиляции объекта.

В качестве цели в данной работе рассматривается разработка оптимального по быстродействию управления проветриванием в условиях знакопеременной характеристики объекта управления – выемочного участка.

#### *Синтез оптимального по быстродействию управления проветриванием выемочного участка как объекта со знакопеременной характеристикой*

В первом приближении оператор выемочного участка определяется совокупностью следующих уравнений массопереноса.

Общий дебит метана на участке определяется выделением газа из выработанного пространства и лавы:

$$Q_{му} = Q_{mv} + Q_{ml} \quad (1)$$

Для относительных безразмерных приращений уравнение (1) принимает вид:

$$q(t) = \theta_l q_l(t) + \theta_v q_v(t), \quad (2)$$

где  $q = (Q_{му} - Q_{о\mu y}) / Q_{о\mu y}$ ,  $q_v = (Q_{mv} - Q_{оmv}) / Q_{оmv}$ ,  $q_l = (Q_{ml} - Q_{оml}) / Q_{оml}$  – относительное приращение дебита метана соответственно на участке, из выработанного пространства и из лавы;  $\theta_l = Q_{оml} / Q_{о\mu y}$ ;  $\theta_v = Q_{оmv} / Q_{о\mu y}$ ;  $Q_{о\mu y}$ ,  $Q_{оml}$ ,  $Q_{оmv}$  – дебит метана в установившемся режиме соответственно на участке, из выработанного пространства и из лавы.

С учетом средней концентрации метана по всему объему утечек воздуха масса метана, выно-

симого утечками воздуха, описывается зависимостью [3]:

$$\frac{dq_{\epsilon}}{dt} + \frac{1}{T_{\epsilon}} q_{\epsilon} = m \frac{dG}{dt}, \quad (3)$$

где  $m$  - коэффициент турбулентности выработанного пространства;  $T_{\epsilon}$  - время однократного обмена воздуха в выработанном пространстве.

При использовании И-регулятора для изменения управляемого параметра участка изменение расхода описывается зависимостью:

$$dG/dt=U, \quad (4)$$

где  $U$  – управление.

Не ограничивая общности рассмотрения, построим оптимальную по быстродействию систему управления по газу при нулевом возмущении из лавы ( $q_{\epsilon}=0$ ). В силу чего, согласно (2), (3) движение объекта будет описываться уравнением:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{T_{\epsilon}} q = m\theta_{\epsilon}U. \quad (5)$$

Проведем оптимизацию процессов перехода от исходного режима проветривания ( $G_{ис}, q_{ис}$ ) в желаемое состояние ( $G_{жс}, q_{жс}$ ) за минимальное время при ограничении уровня управляющего воздействия  $U$  – скорости изменения расхода воздуха на участке. Физически максимальное значение управления  $U$  определяется конструкцией шибера, перекрывающего сечение выработки, и может регулироваться в типовых регуляторах сечения выработок в области  $[-5 \cdot 10^{-3}; 5 \cdot 10^{-3}] \text{ с}^{-1}$ . На оптимальных траекториях движения объекта будем принимать  $U=\pm U_m$ .

Линию переключения оптимального управления определим методом «попятного» движения системы (4, 5), начиная с некоторого желаемого конечного состояния ( $0, G_{жс}$ ) [4]:

$$T_{\epsilon} \frac{dq}{d\tau} - q = -m \cdot U \cdot \theta_m \cdot T_{\epsilon}; \quad (6)$$

$$dG/d\tau = -U, \quad (7)$$

где  $\tau = t_{жс} - t$ ;  $t_{жс}$  – время оптимального процесса;  $\tau$  - «обратное» время.

Из решения (6), (7) при  $U=\pm U_m$  получим:

$$q_{лн}(G) = \theta_{\epsilon} \cdot m \cdot T_{\epsilon} \cdot U_m \cdot e^{(sign(\lambda)\lambda/(T_{\epsilon}U)-1)}, \quad (8)$$

где  $\lambda=G-G_{жс}$ .

Оптимальные по быстродействию процессы по газу на участке обеспечиваются при формировании управления по закону [4]:

$$\varphi = q - q_{лн}; \quad (9)$$

$$U = \begin{cases} U_m \cdot sign(\varphi), \text{ при } \varphi \neq 0; \\ U_m \cdot sign(G_{жс} - G), \text{ при } \varphi = 0. \end{cases} \quad (10)$$

В законе оптимального управления по газу (8-10) использован объем газа  $q$  на выходе объекта – не измеряемая величина. Реальными данными измерительной системы являются расход воздуха  $Q$  и концентрация метана  $C$ , по которым

искомую координату можно вычислить исходя из этих значений средней концентрации метана и расхода воздуха на выходе вентиляционного штрека участка, описываемой уравнением массопереноса [5]:

$$V_{вщ} \frac{dC}{dt} + QC = Q_{mv}, \quad (11)$$

где  $V_{вщ}$  – объем выработки с интенсивным перемешиванием газа, выносимого утечками воздуха, и основного потока воздуха.

В первом приближении выражение (11) может быть представлено уравнением:

$$T_{вщ} \frac{dk}{dt} + k = q - G,$$

где  $T_{вщ} = V_{вщ}/Q_0$  – время однократного обмена воздуха во всем объеме перемешивания метановоздушной массы;  $k = (C - C_0) / C_0$  – относительное изменение концентрации метана на участке;  $C_0$  – номинальное содержание газа в выходном потоке.

Отсюда следует, что расчет управляемой координаты оптимальной системы (8-10) можно производить по формуле:

$$q = T_{вщ} dk/dt + k + G. \quad (12)$$

### Определение характеристик блока наблюдения

В выражении (12) производная  $dk/dt$  является ненаблюдаемой величиной, поэтому для оценки реального значения производной  $dk/dt$  используем в блоке наблюдателя (рис.4) дифференцирующую цепочку:

$$T_{\phi} \frac{dx}{dt} + x = k(t), \quad (13)$$

где  $T_{\phi}$  – постоянная времени фильтра.

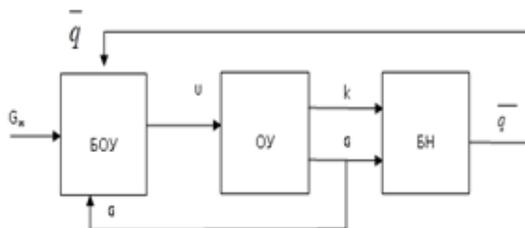


Рисунок 4 – Функциональная структура системы оптимального управления проветриванием выемочного участка:

БОУ – блок оптимального управления; ОУ – объект управления; БН – блок наблюдателя

При этом для исключения существенного влияния инерционности фильтра на динамику системы управления примем постоянную времени фильтра значительно меньшей постоянной времени по газу  $T_{\epsilon}$  ( $T_{\epsilon} \approx 2000 \text{ с}$ ). Тогда достаточно строго можно считать, что  $dx/dt \approx dk/dt$ .

В силу этого в законе управления оценка объема регулируемого газа  $\bar{q}$  в блоке наблюдения системы (рис.3) определим из равенства:

$$\dot{q} = T_{\text{фи}} \frac{dx}{dt} + k + G.$$

Методами моделювання була досліджена залежність погрешності диференціювання, яка впливає на точність системи управління, від значень постійної фільтра і управляючого впливу. При цьому вибір управляючого впливу впливає також на час регулювання, а відповідно, і на швидкість системи управління. Виходячи з (12-13) постійна фільтра  $T_{\text{фи}}$  повинна бути суттєво менше постійної часу вентиляційного штрафа  $T_{\text{фи}}$ . С іншої сторони при великому значенні  $T_{\text{фи}}$  блок системи управління спрощується. В реальній шахтній вентиляційній мережі постійна часу вентиляційного штрафа становить  $T_{\text{фи}} \approx 60\text{с}$ . Тому в роботі був досліджений фільтр (13) з постійними часами  $T_{\text{фи1}} = T_{\text{фи}}/10 = 6\text{с}$ ,  $T_{\text{фи2}} = T_{\text{фи}}/5 = 12\text{с}$ ,  $T_{\text{фи3}} = T_{\text{фи}}/20 = 3\text{с}$ . З комп'ютерних експериментів випливає (рис.5), що при управляючому впливі  $U_m = 2/T$  час регулювання становить  $2000\text{с}$  і порівняємо з постійною часу по газу, що в 3 рази менше часу встановлення стаціонарного режиму при простому переключенні управління. При цьому погрешність блоку диференціювання (13) не перевищує 10% при  $T_{\text{фи2}}$  і  $T_{\text{фи3}}$ , в силу цього оптимальні параметри системи управління приймалися рівними:  $T_{\text{фи}} = 6\text{с}$ ,  $U_m = 2/T$ .

#### Исследование оптимальных по быстродействию азрогазодинамических процессов при обработке заданных режимов работы объекта

Апробація алгоритму управління здійснювалась в умовах виємочного участку, фізичні параметри якого характерні для метанообильних шахт Донбасу [3]. При цьому постійна фільтра в модельному експерименті приймалась рівною  $T_{\text{фи}} = 6\text{с}$  (рис.5). Розроблена модель системи диспетчерського управління, об'єкта управління і блоку спостереження показана на рис. 6. Ядром блоку управління є пристрій управління, реалізоване на основі блоку Function. Аналого-цифровий і цифро-аналоговий преобразувачі в моделі системи управління реалізовані з використанням блоків ЗОН. Висувальний блок в залежності від початкових умов і бажаного кінцевого стану участку формує (з періодом квантування  $1\text{с}$ ) в кожній точці фазових траєкторій потрібне граничне значення управляючого впливу  $\pm U_m$ . Моменти переключення знаку управління формуються в відповідності з розробленим алгоритмом оптимального управління (8-10).

Желаемое значение расхода воздуха задается в модели блоком Step, настроенным на изме-

нение режима проветривания от  $G=0$  до  $G=0.5$  в момент времени  $50\text{с}$ . Блоки *filtr\_Sum*, *filtr\_Gain*, *filtr\_Integrator* моделюють блок спостереження (13). На виході операторного блоку *q\_Sum* формується розрахункове значення ненаблюдаемой координаты дебита метана в відповідності з вираженням (12). Ця координата передається на вхід системи управління. Модель об'єкта управління (2-5) реалізована в підсистемі *object*, представленій на рис.6,б. На вхід підсистеми поступають управляючий вплив і дебит метана в лаві  $q_l$  (в моделі  $q_l=0$ ). В операторному блоку *G\_integrator* формується витрата повітря, в блоках *Vsh\_Integrator*, *Tvsh\_Gain*, *Vsh\_Sum* формується концентрація метана. Ці дві величини представляють собою спостережувані координати об'єкта управління.

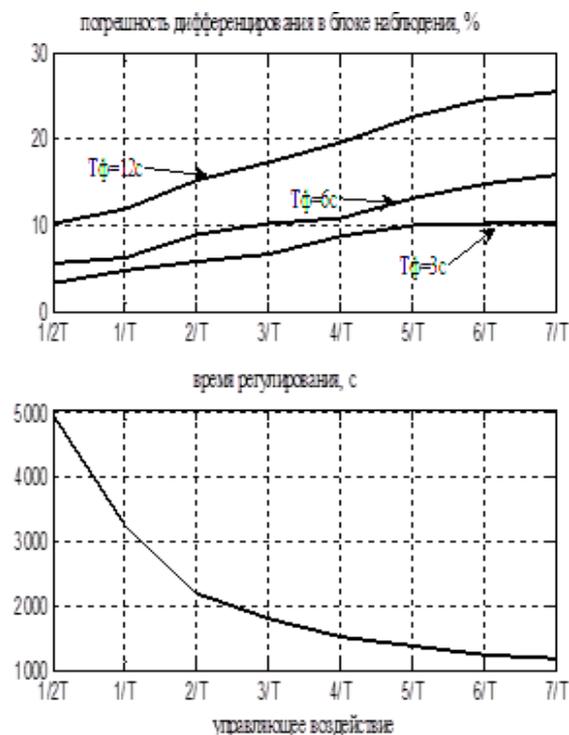


Рисунок 5 – Залежність погрешності фільтра при варіаціях управляючого впливу і постійних часу фільтра

Для коректного урахування обмеження газодобування і відповідно відносного дебіта метана на рівні  $q^{\text{min}}(t) = -1$  в газодинамічній моделі використані блоки одностороннього насичення (блок *Saturation*). При цьому для виключення зниження інтегральної складової сигналу  $q(t)$  на вході блоку одностороннього насичення нижче граничного значення  $q^{\text{min}}(t) = -1$  в моделі використана ланка зворотних зв'язей,

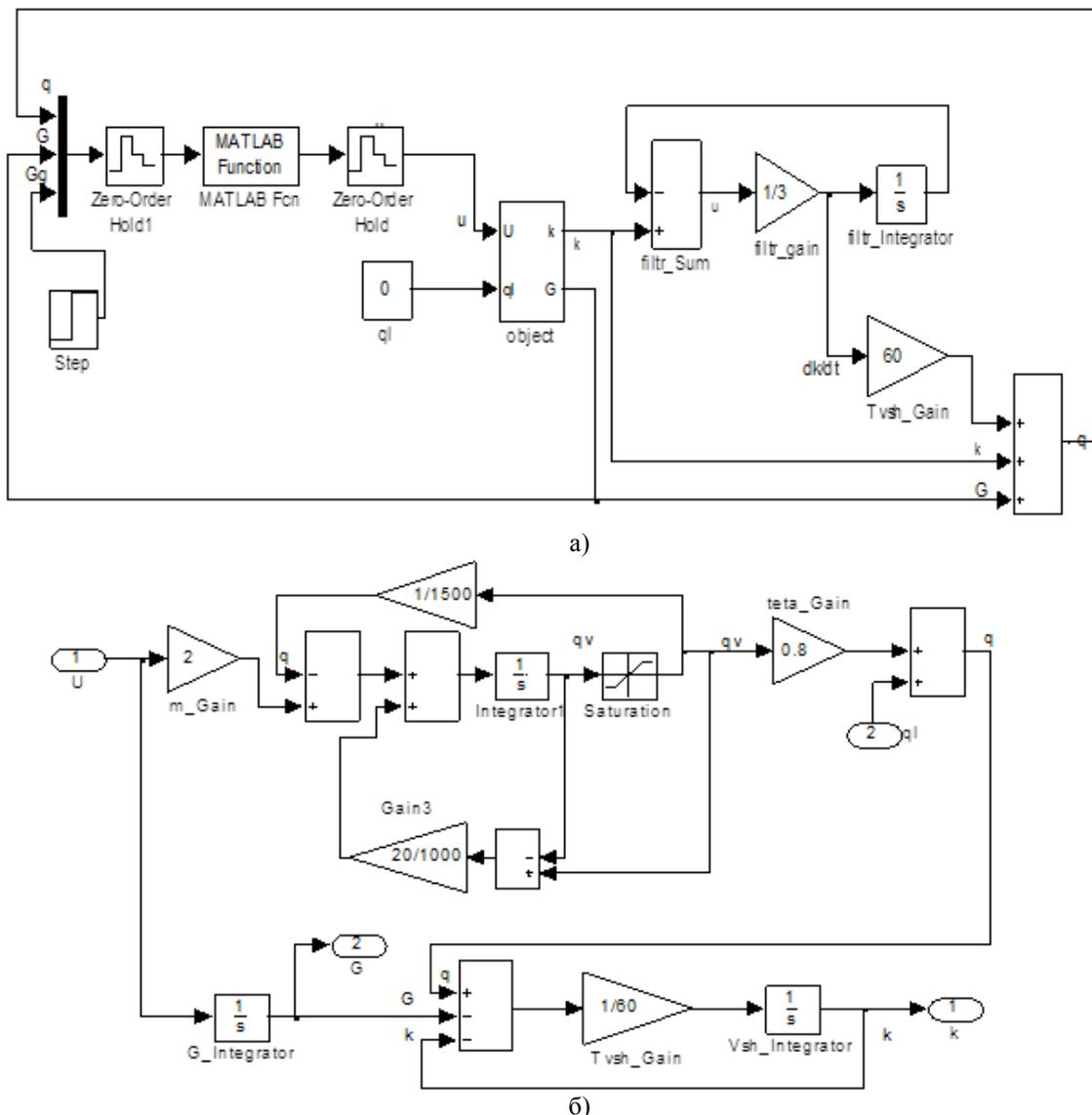


Рисунок 6 - Аналого-цифровая модель оптимального по быстродействию контура регулирования проветриванием на участке (а) и газодинамическая модель участка – объекта управления (б)

в результате действия которой на входе интегратора *integrator1* (1/s) устанавливается нулевой уровень сигнала при достижении уровня  $q^{min}(t) = -1$  на выходе ограничителя (блока Saturation). В силу чего в газодинамической модели участка гарантируется адекватное отображение физических свойств процессов газовыделения из выработанного пространства при реверсе скорости изменения расхода воздуха.

Графики процессов управления переходных процессов содержат временные зависимости процессов управления (рис. 7,а) и фазовые траектории процесса управления в системе фазовых координат (q-G) и (k-G) (рис. 7,б). Начальное положение изображающей точки в фазовой плоскости (q-G) соответствует точке (0, -0.5) и представляет собой некоторый исходный стационарный режим проветривания на участке, соответствующий

изображающей точке (0.5, -0.5) в плоскости (k-G). В момент времени (t=50c) по заданию диспетчера вентиляционной службы включается автоматический режим отработки заданного дебита воздуха на участке  $G_{жс} = 0.5$ . По завершении переходного процесса на участке устанавливается заданный расход воздуха и желаемые значения концентрации метана при нулевом значении общего относительного дебита метана. При пуске системы управления изображающая точка находится выше линии переключения, поэтому под воздействием положительного управляющего воздействия движется до линии переключения, и после ее достижения знак управляющего воздействия инвертируется. После этого изображающая точка



**Список литературы**

1. Соловников В.В. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями / В.В. Соловников. – М., Машиностроение, 1972. – 270 с.
2. Абрамов Ф.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии / Абрамов Ф.А., Фельдман Л.П., Святный В.А. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.
3. Лапко В.В. Математическая модель и исследование переходных газодинамических процессов на выемочных участках шахт Донбасса / В.В. Лапко, О.Ю. Чередникова // Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – №2. – С.115-120.
4. Чередникова О.Ю. Синтез и исследование алгоритмов оптимального по быстродействию управления / О.Ю. Чередникова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2013. – №1(17) – С.43-47.
5. Фельдман Л.П. Уравнения неустойчившегося движения метано-воздушной смеси в выработках и выработанном пространстве участка / Л.П. Фельдман // Разработка месторождений полезных ископаемых. – Киев: Техника, 1971, вып.22. – С.95-105.

*Надійшла до редакції 20.03.2014*

**О.Ю. ЧЕРЕДНИКОВА**

Донецький національний технічний університет

**ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКА СПОСТЕРЕЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ШВИДКОДІЄЮ УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТОМ ЗІ ЗНАКОЗМІННОЮ ХАРАКТЕРИСТИКОЮ МЕТОДАМИ МОДЕЛЮВАННЯ**

Розглянуто синтез оптимального за швидкодією керування об'єктом зі знакозмінною характеристикою - виїмковою ділянкою вугільних шахт. В управлінні запропоновано використовувати спеціально обчислювальну проміжну однополярну змінну, тобто координату, яка не має знакозмінної характеристики, розрахунок якої відбувається в блоці спостереження. Методами математичного моделювання визначено оптимальні характеристики блока спостереження і показана працездатність і ефективність запропонованих алгоритмів.

**Ключові слова:** *фазова площина, оптимальне управління, знакозмінна характеристика об'єкта, блок спостереження, виїмкова ділянка, режим провітрювання.*

**О.Ю. CHEREDNIKOVA**

Donetsk National Technical University

**MODELING RESEARCH OF THE CHARACTERISTICS OF AN OBSERVER UNIT OF SPEED-OPTIMAL OBJECT CONTROL WITH ALTERNATING CHARACTERISTIC**

The synthesis of speed-optimal control for an object with sign-alternating characteristic – excavation site of coal mines - was considered. The physical object is gas-dynamic processes on methane excavation areas of Donbas mines, a specific feature of which is the large inertia of transient processes. The purpose of control is the working of specified (desired) air flow and the reduction of the flow rate of methane up to the nominal value for the setting of a given concentration of methane using speed-optimal algorithm. Sign-alternating characteristic of methane concentration leads to release of methane, which complicates the synthesis of control system and complicates the control law - with increased flow of air for the first time since the beginning of the regulation on methane excavation areas takes place "splash" of methane concentration due to more intensive methane extraction from out space. To improve the performance of control system the original new approach to the synthesis of the control law was proposed. As the control law it is proposed to use a unipolar variable clearly identified at the regulated coordinate - methane concentration. The mathematical description of the specified object has been developed as a result of research, the task has been formulated and the synthesis of speed-optimal control using the phase plane method has been performed. The article defines optimal characteristics of the observer unit. Approval of developed control was done with methods of mathematical modeling. It is shown that the proposed control law provides sustainable management and a significant acceleration of testing of the specified object's mode. Further developments are associated with the modernization of the control algorithm to reach the effect of one of the phase coordinates restriction at the acceptable level. The results will be used in the aero-gas informational complex (КАГИ), implemented by 60 mines of Donbas.

**Key words:** *phase plane, optimal control, sign-alternating characteristic of the object, surveillance unit, working site, ventilation mode.*