

УДК 681.5

О. Ю. Чередникова (к.т.н., доц.)

Донецкий национальный технический университет
ola@cs.dgtu.donetsk.ua

СИНТЕЗ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЯ С ОГРАНИЧЕНИЕМ РЕГУЛИРУЕМОЙ КООРДИНАТЫ

Рассматривается синтез оптимального по быстродействию управления объектом второго порядка с ограничением регулируемой координаты на допустимом уровне. Физический объект представляет газодинамические процессы на метанообильных выемочных участках шахт Донбасса, специфическим свойством которых является большая инерционность переходных процессов. Разработано математическое описание указанного объекта, сформулирована задача и выполнен синтез квазиоптимального по быстродействию управления методом фазовой плоскости, построена сигнум-функция, разработана структура замкнутой системы оптимального управления. Выполнены экспериментальные исследования системы методом математического моделирования.

Ключевые слова: Концентрация метана, фазовые траектории, алгоритм оптимального управления, контур диспетчерского управления

Введение

В работе рассматривается задача перевода объекта из одного положения в другое за минимальное время, т.е. задача оптимального быстродействия. На сегодняшний день имеются решения задачи оптимального по быстродействию управления для линейных и нелинейных объектов, задачи построения оптимального управления в замкнутой системе[1,2]. Также имеется ряд эффективных решений задачи оптимального по быстродействию управления для конкретных технологических объектов.

Однако часто на практике строго оптимальное управление требуется сравнительно редко, важнее получить быстродействие, близкое к предельному, но при более простой реализации управляющего устройства или с учетом ограничений регулируемых (фазовых) координат. Получающиеся при этом системы также называются квазиоптимальными.

В данной работе предложен алгоритм квазиоптимального управления специальным объектом - выемочным участком с ограничением концентрации метана на допустимом уровне.

Разработка алгоритмов безопасного квазиоптимального по быстродействию управления проветриванием выемочных участков

Математическая модель рассматриваемого объекта управления (выемочного участка) имеет вид [3]:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{T}q = 2U; \quad \frac{dG}{dt} = U; \quad (1)$$

$$\frac{Q - Q_0}{Q_0} = G; \quad \frac{Q_m - Q_{0,m}}{Q_{0,m}} = q; \quad (2)$$

$$\frac{Q_m}{Q} * 100\% = C, \quad (3)$$

где U – скорость изменения расхода воздуха на участке, принятая в системе регулирования в качестве управляющего воздействия; Q_m – дебит метана на участке; G – относительное изменение расхода воздуха на участке; q – относительное изменение дебита метана на участке; T – время однократного обмена воздуха на участке; Q_0 , $Q_{0,m}$ – номинальные значения соответственно расхода воздуха и дебита метана; C – концентрация метана в исходящей струе участка.

Целью регулирования является отработка оптимальным по быстродействию образом заданного (желаемого) расхода воздуха $G_{жс}$ и номинального дебита метана ($q=0$), т.е. установление концентрации метана на штатном (номинальном) уровне. При этом по правилам безопасности концентрация метана (C) ограничивается уровнем 1%.

Структура предлагаемого контура управления показана на рис.1. Основой контура управления по газовому фактору является блок оптимального управления, построенный на основе данных о желаемом ($G_{жс}$) и текущем (G) расходах воздуха, предельном и номинальном уровне концентрации метана и текущем (q) уровне дебита метана.

Для обеспечения наилучшего по быстродействию управления в соответствии с теоремой Фельдбаума «об n интервалах» [4] выемочный участок, описываемый системой второго порядка (1), должен иметь максимально две линии оптимальных по быстродействию фазовых траекторий при предельно допустимых значениях управления ($U = \pm U_m$) и одно переключение знака управления (точку реверса). Для формирования момента переключения управляющего воздействия были построены из заданного желаемого состояния участка методом «попятного» движения линии переключения в фазовой плоскости « G - q » при максимально допустимых значениях управления $U = \pm U_m$.

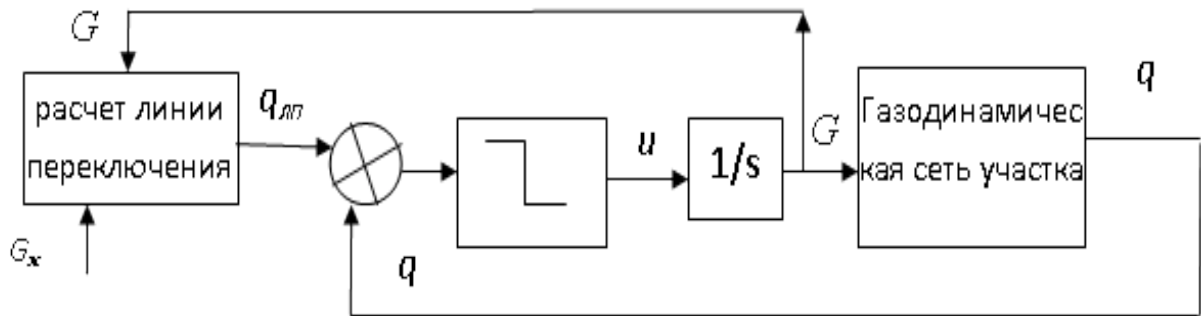


Рисунок 1– Структура контура управления проветриванием выемочного участка

При этом алгоритм оптимального по быстродействию управления сводится к определению точки реверса управляющего воздействия в плоскости $(G-q)$. Сигнум-функция при этом имеет вид:

$$u = U_m \cdot \text{sign}(q_{\text{фн}}),$$

где $q_{\text{фн}} = (q - q_{\text{лп}})$ – функция переключения знака управления; $q_{\text{лп}}$ – уравнение линии переключения знака управления в плоскости $(G-q)$;

$$q_{\text{лп}} = \begin{cases} q_o(G), \text{ если } G \geq G_{\text{жс}}; \\ q_p(G), \text{ если } G < G_{\text{жс}}. \end{cases}$$

где $q_p(G) = 2 \cdot \overline{U_m} \cdot (1 - e^{-(G-G_{\text{жс}})/\overline{U_m}})$;

$$q_o(G) = -2 \cdot \overline{U_m} \cdot (1 - e^{(G-G_{\text{жс}})/\overline{U_m}}); \quad \overline{U_m} = T \cdot U_m.$$

При реализации безопасного алгоритма управления проветриванием концентрация метана не должна превышать допустимый уровень $C_{\text{зр}} = 1\%$. В силу этого при достижении предельно допустимого уровня концентрации метана алгоритм оптимального по быстродействию управления должен трансформироваться таким образом, чтобы изображающая точка, попав в зону допустимых значений концентрации метана, «скользила» вдоль линии допустимого уровня, продолжая свое движение к линии переключения, по которой оптимальным по быстродействию образом возможна отработка конечного состояния.

В предложенной системе концентрация метана не является регулируемой координатой, поэтому найдем граничное значение дебита метана ($q_{\text{зр}}$), которое соответствует предельной концентрации метана $C_{\text{зр}} = 1\%$ [5]. Для перерасчета $C_{\text{зр}}$ в $q_{\text{зр}}$ представим в соответствии (2) расход воздуха и дебит метана соотношениями:

$$Q_m = Q_{0m} \cdot (1 + q); \quad Q = Q_0 \cdot (1 + G).$$

Подставив полученные выражения в (3), получим:

$$C = \frac{Q_{0m} * (1 + q)}{Q_0 * (1 + G)} = C_0 \frac{1 + q}{1 + G}.$$

Отсюда для гранично допустимого значения дебита метана имеем:

$$q_{гр} = \frac{C_{сп} * (1 + G)}{C_0}.$$

При типичном для шахтных условий номинальном уровне концентрации метана $C_0=0.75\%$ и $C_{гр}=1\%$, окончательно получим:

$$q_{гр} = \frac{1}{3} + \frac{4}{3}G. \quad (4)$$

При достижении изображающей точной значения, соответствующего предельно допустимой концентрации метана, может быть предложено два варианта управления. Регулирование с ограничением можно осуществить с использованием непрерывного закона управления. Подставив в уравнение (1) выражение для гранично-допустимого значения дебита метана $q_{гр}$, получим формулу расчета нелинейного управляющего воздействия:

$$U_{гр} = \frac{1 + 4G}{2T}.$$

Во втором варианте для движения с ограничением использовалось двухпозиционное релейное управление $\bar{U} = \pm U_m$. Для реализации этого «скользящего» режима управления («колебательного» управления) переключение знака управляющего воздействия (для задания порога переключения релейного управления) были введены две линии переключения: верхняя $q_{гр}$ и параллельная ей линия нижнего уровня $q_n = q_{гр} - \Delta q$. Очевидно, что в этом случае в процессе отработки $G=G_{ж}$ изображающая точка в среднем будет «двигаться» вокруг среднего уровня $q_{сп} = (q_{гр} - q_n)/2$, который в колебательном режиме будет выступать как задающее значение концентрации метана. Отметим, что при достаточно малом значении $\Delta q = q_{гр} - q_n$ уровни $q_{сп}$ и $q_{гр}$ практически будут совпадать, что обеспечит скольжение изображающей точки вблизи $q_{сп} \approx q_{гр}$ ($q_{сп} < q_{гр}$) при регулировании расхода воздуха.

Заметим, что преимуществом скользящего режима управления с ограничением концентрации метана на безопасном уровне является простота формирования закона управления, т.к. на всех этапах управления используется дискретное управление, которое не зависит от значений параметров участка.

В двухпозиционном релейном режиме управления в зоне скольжения « $q_n - q_{гр}$ » при $U = +U_m$ расход воздуха увеличивается до некоторого значения ΔG_n за время перехода дебита метана от нижнего (q_n) до верхнего ($q_{гр}$) уровня. При $U = -U_m$ изменение дебита воздуха уменьшается на некоторое значение $|\Delta G_m|$ после переключения релейного управления на

«линии переключения» $q_{cp} \approx q_{ep}$. Очевидно, что только при соблюдении неравенства $\Delta G_n / |\Delta G_m| > 1$ движение изображающей точки в плоскости $(G-q)$ будет происходить вдоль ограничивающей линии $q_{cp} \approx q_{don}$ вправо. Следовательно, только в этом случае релейный режим управления ($\pm U_m$) обеспечивает наращивание расхода воздуха с ограничением дебита метана практически на допустимом уровне q_{ep} . В том случае, если в течение произвольного периода управления имеет место $\Delta G_n / |\Delta G_m| < 1$, то движение изображающей точки с ограничением концентрации метана на заданном уровне $q_{cp} \approx q_{ep}$ возможно только в режиме уменьшения расхода воздуха. Следовательно, в таких зонах фазовой плоскости $(G-q)$ в скользящем режиме ($\pm U_m$) невозможно обеспечить наращивание дебита воздуха с ограничением концентрации метана на заданном уровне, т.е. безопасное управление участком по газу.

Для определения зон «безопасного» и «аварийного» (небезопасного) управления в скользящем режиме подставим в уравнение (1) $q = q_{ep}$ (в соответствии с (4)) и запишем его в виде:

$$\frac{2T}{3} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{3} + \frac{4}{3} G.$$

Отсюда следует, что $\frac{dG}{dt} > 0$ при $(\frac{1}{3} + \frac{4}{3} G) > 0$, т.е. при $G > -0.25$, и, соответственно, $\frac{dG}{dt} < 0$ при $(\frac{1}{3} + \frac{4}{3} G) < 0$, т.е. при $G < -0.25$. Следовательно, только при $G > -0.25$ возможно увеличение расхода воздуха при движении по ограничивающей прямой. Таким образом, через точку $(-0.25, 0)$ проходит «безопасная» линия переключения, выше которой невозможно обеспечить безопасное управление вентиляцией на участке:

$$q_{\text{нб}} = \begin{cases} 2 \cdot \overline{U_m} \cdot (1 - e^{-(G+0.25)/\overline{U_m}}), & \text{если } G \geq -0.25; \\ -2 \cdot \overline{U_m} \cdot (1 - e^{(G+0.25)/\overline{U_m}}), & \text{если } G < -0.25. \end{cases}$$

Исследование качественных характеристик разработанных алгоритмов квазиоптимального управления по быстродействию безопасного управления

Исследование качественных характеристик разработанных алгоритмов выполнено с использованием модели, показанной на рис.3.

Предполагается, что конечное желаемое состояние участка и его параметры в системе задаются извне (например, диспетчером). Ядром блока управления является вычислительное цифровое устройство управления, которое реализовано на основе блока Function. Аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи в модели системы

управління реалізовані на основі блоків ZOH. Вычислительный блок в зависимости от начальных условий и желаемого конечного состояния участка формирует (с периодом квантования T_c) в каждой точке фазовых траекторий требуемое предельное значение управляющего воздействия $\pm U_m$. Моменты переключения знака управления формируются в соответствии с разработанным алгоритмом оптимального управления. Для корректного учета ограничения газовыделения и соответственно относительного дебита метана на уровне $q_B^{\min}(t) = -1$ в

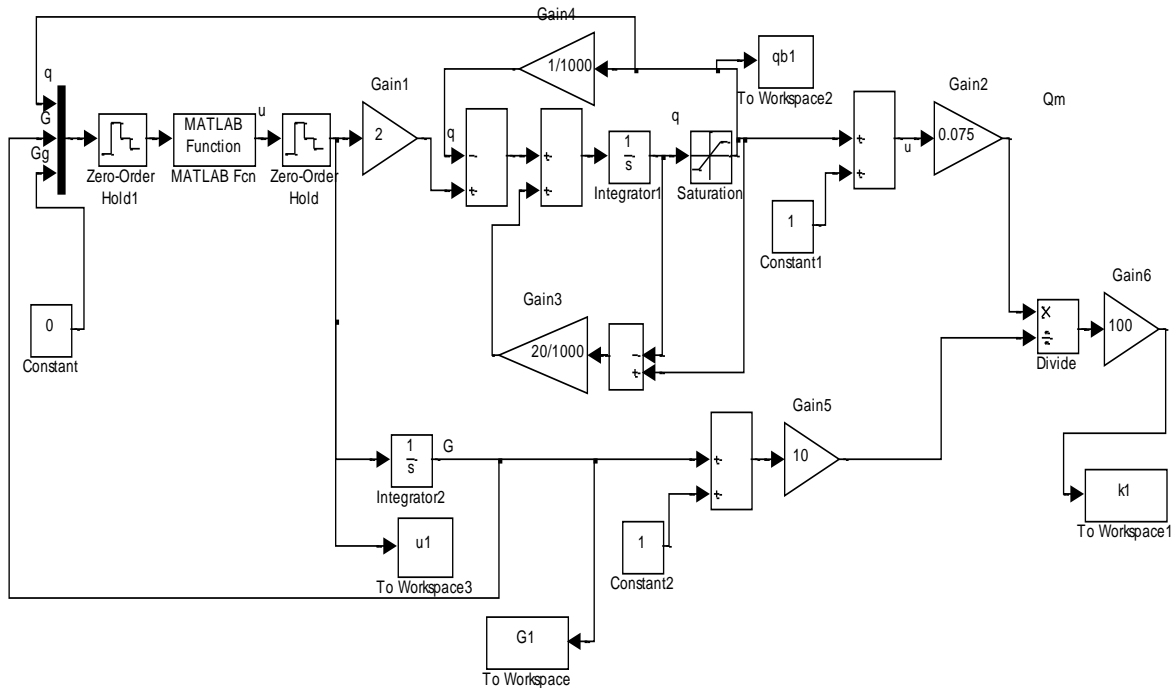


Рисунок 2 – Аналого-цифровая модель оптимального по быстродействию контура регулирования проветриванием на участке

газодинамической модели использованы блоки одностороннего насыщения (блок Saturation). При этом для исключения снижения интегральной составляющей сигнала на входе блока одностороннего насыщения ниже предельного значения в модели использована цепочка обратных связей, в результате действия которой на входе интегратора integrator1 (1/s) устанавливается нулевой уровень сигнала при достижении уровня на выходе ограничителя (блока Saturation). Следовательно, в газодинамической модели участка гарантируется адекватное отображение физических свойств процессов газовыделения из выработанного пространства при реверсе скорости изменения расхода воздуха.

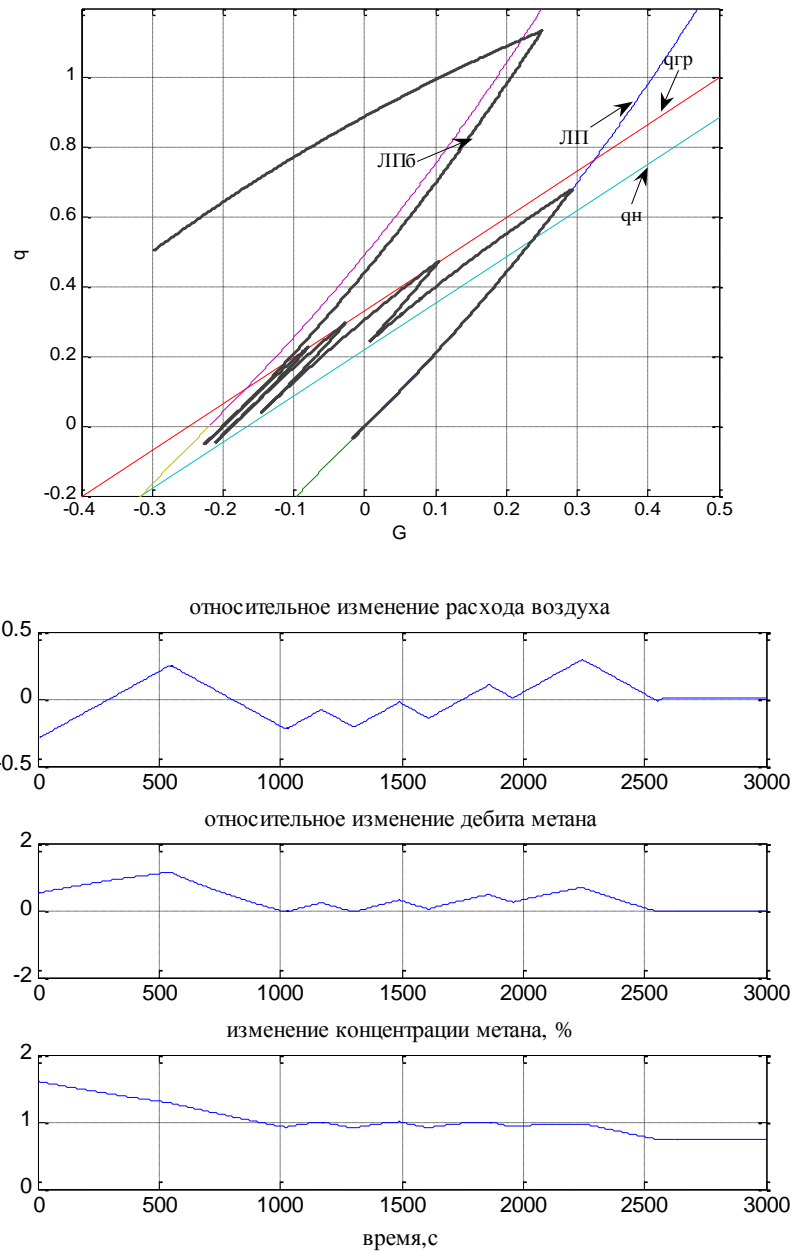


Рисунок 3 – Фазовые и временные траектории процессов управления проветриванием. Параметры модели: $G_0 = -0.3$, $q_0 = 0.5$, $G_{жс} = 0$, $q_{жс} = 0$, $T = 1000c$

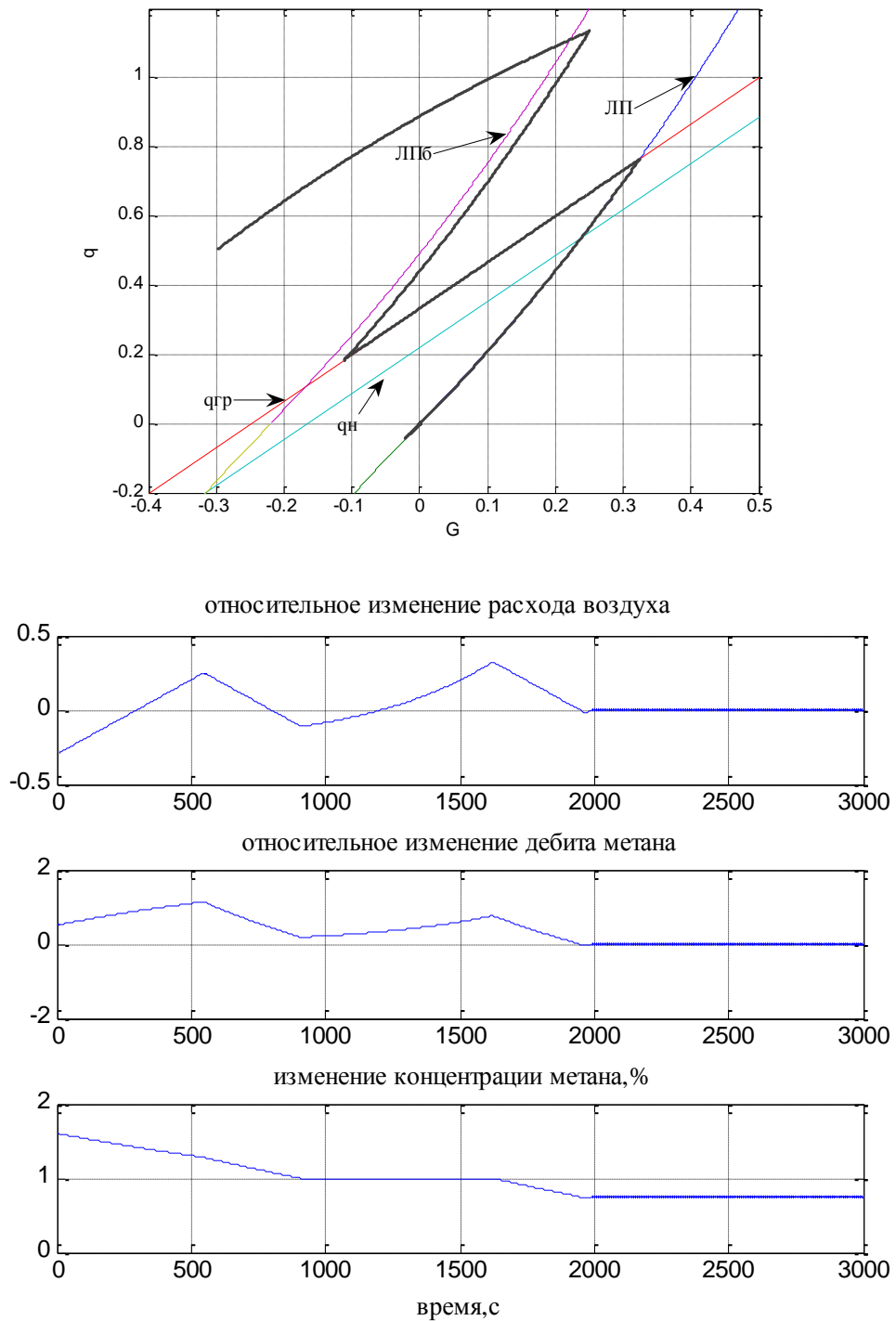


Рисунок 4 – Фазовые и временные траектории процессов нелинейного управления проветриванием.

Параметры модели: $G_0 = -0.3$, $q_0 = 0.5$, $G_{жс} = 0$, $q_{жс} = 0$, $T = 1000c$

Методами математического моделирования газодинамических процессов при диспетчерском безопасном регулировании участков подтверждена работоспособность разработанных алгоритмов. На рис. 3, 4 показаны процессы регулирования проветриванием для модели с постоянной времени $T=1000\text{с.}$, $G_{жс}=0$, $G_0=-0.3$ и $q_0=0$, $U_m = 1$.

На рис.3 показаны результаты моделирования безопасного управления с использованием скользящего режима управления. Результаты моделирования безопасного управления с использованием непрерывного управляющего воздействия показаны на рис. 4.

Из полученных результатов моделирования следует, что установление желаемого состояния, т.е. окончание переходного процесса, происходит за время 2500с (скользящий режим) и 2000с (непрерывное управление) (рис.3,4). Оптимальное с ограничением управление характеризуется значительно меньшей длительностью переходного процесса, которое для модели с постоянной времени 1000с при обычном разгазировании составляет примерно 3000с.

Выводы

Разработана структура и алгоритмы системы квазиоптимального по быстродействию управления с ограничением концентрации метана. При этом управление производится по специальной расчетной фазовой координате – дебиту метана на выходе регулируемого по газу участка.

Методами математического моделирования показано, что в системе обеспечивается ограничение расчетной фазовой координаты.

Показано, что квазиоптимальное колебательное управление обеспечивает уменьшение времени регулирования по сравнению с обычным регулированием.

Дальнейшие исследования связаны с применением данного алгоритма для моделирования процессов управления проветриванием в шахтной вентиляционной сети (ШВС), а также с внедрением разработанных алгоритмов в реальную диспетчерскую систему управления ШВС.

Список литературы

1. Сухинин Б.В. Синтез оптимальных по быстродействию систем на основании использования теоремы об интервалах управления // Б.В. Сухинин, В.В. Сурков, А.Э. Соловьев // Вести высших учебных заведений Черноморья. - №2. – 2010.- С. 57 - 63.
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 – 121.

4. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Часть 2. Специальные линейные и нелинейные системы автоматического регулирования одной величины. / А.А. Воронов. – М.: Энергия, 1966. – 325с.

5. 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». - №1(17) 2013р. – С.43-47.

Надійшла до редколегії 15.10.2013р. Рецензент: к.т.н., проф. Лапко В.В.

О. Ю. Чередникова

Донецький національний технічний університет, кафедра комп'ютерної інженерії

Синтез замкнутої системи оптимального за швидкістю керування з обмеженням регульованої координати. Розглядається синтез оптимального за швидкістю керування об'єктом другого порядку з обмеженням регульованої координати на допустимому рівні. Фізичний об'єкт являє газодинамічні процеси на метанозбагачених виїмкових ділянках шахт Донбасу, специфічною властивістю яких є велика інерційність перехідних процесів. Розроблено математичний опис зазначеного об'єкта, сформульовано завдання та виконано синтез квазіоптимального за швидкістю керування методом фазової площини, побудована сигнум-функція, розроблена структура замкнутої системи оптимального управління. Виконані експериментальні дослідження системи методом математичного моделювання.

Ключові слова: Концентрація метану, фазові траєкторії, алгоритм оптимального керування, контур диспетчерського керування

O. Yu. Cherednikova

Donetsk national technical university

Synthesis of closed system of the speed-optimal control with the restriction of adjustable coordinates. The article discusses the synthesis of speed-optimal control of the object of the second order. 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 regulation is working specified (desired) air flow and the reduction of the flow rate of methane to the nominal value for the establishment of a given concentration of methane using speed-optimal algorithm with account a restriction of methane concentration at the acceptable level. As a result of research, the mathematical description of the specified object has been developed, the task has been formulated and the synthesis of speed-kvazioptimal control with restriction of methane concentration using method of the phase plane has been performed. The Signum-function has been built; the structure of the closed system of optimal control has been developed. Working of an algorithm for speed-optimal control is based on the use of theorem by Feldbaum. According to this theorem system of the second order must have two phase trajectories and, respectively, one switch of the sign (point reverse). At the same time, in the closed system the Signum-function is constructed by the method of

«backward» movement from the end of the requested state. When reaching the maximum permissible concentration of methane algorithm transforms. It is offered two variants of the algorithm. The first option is using a continuous control law. In the second variant was used on-off relay control. Experimental researches of the system have been done by the method of mathematical modeling. The results of the algorithm simulation confirmed its efficiency and showed a significant reduction in the regulation time. Further developments associated with application of the algorithm for modeling the processes of control ventilation in the mine ventilation network, as well as with the introduction of the developed algorithms in real dispatching system management mine ventilation network.

Keywords: The concentration of methane, phase trajectory, the algorithm of optimum control, circuit dispatch control