

УДК 681.5.013

О.Ю. Чередникова, канд. техн. наук, доцент.
ГВУЗ "Донецкий национальный технический университет", г. Донецк, Украина
ola@cs.dgtu.donetsk.ua

Синтез и исследование алгоритмов оптимального по быстродействию управления

Рассматривается синтез оптимального по быстродействию управления объектом второго порядка. 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 оптимального по быстродействию управления методом фазовой плоскости, построена сигнум-функция, разработана структура замкнутой системы оптимального управления. Выполнены экспериментальные исследования системы методом математического моделирования.

Ключевые слова: оптимальное управление, фазовая плоскость, моделирование, управление проветриванием.

Введение

Вопросам разработки алгоритмов оптимального по быстродействию управления посвящено большое количество работ [1,2,3]. При этом для систем второго порядка основным методом синтеза оптимального по быстродействию управления является метод фазовой плоскости, разработанный Фельдбаумом [4]. В [4] показано, что оптимальные траектории для объекта второго порядка состоят из двух отрезков оптимального управления, т.е. оптимальное управление обеспечивается путем однократного переключения двухпозиционного управляющего воздействия. При этом в замкнутой системе сигнум-функция строится методом «попятного» движения из конечного требуемого состояния.

На основании этих теоретических положений для управления режимом проветривания выемочных участков угольных шахт были разработаны алгоритмы оптимального по быстродействию управления [1]. При этом в качестве регулируемой координаты в этих работах использовалась концентрация метана на участке. При увеличении расхода воздуха в первый момент времени с начала регулирования на метанообильных участках происходит «всплеск» концентрации метана вследствие более интенсивного выделения метана из выработанного пространства, из-за чего участок представляет собой неминимально-фазовый объект, что усложняет алгоритмы управления [1]. Для упрощения задачи предлагается перейти к управлению по дебиту метана, определяемому произведением концентрации метана на расход воздуха. В этом случае объект представляет минимально-фазовую динамическую систему.

Описание

Синтез алгоритма оптимального по быстродействию управления

В первом приближении переходные газодинамические процессы на выемочном участке шахты описываются системой уравнений [2]:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{T}q = 2U; \frac{dG}{dt} = U; \frac{Q - Q_0}{Q_0} = G;$$

$$\frac{Q_m - Q_{0,m}}{Q_{0,m}} = q \frac{Q_m}{Q} * 100\% = C, \quad (1)$$

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.

Исходя из определения $q(t) \geq -1$.

Целью регулирования является отработка оптимальным по быстродействию образом заданного (желаемого) расхода воздуха $G_{ж}$ и снижение дебита метана до номинального значения ($q=0$) для установления заданной концентрации 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 построим из заданного желаемого состояния участка методом «попятного» движения линии переключения в фазовой плоскости « $G-q$ » при максимально допустимых значениях управления $U=\pm U_m$.

С этой целью сначала предположим, что в исходном состоянии изображающая точка системы (1) $M_0(G_0 > G_{жс}, q_0)$ находится на линии переключения (фазовой траектории) при управлении $U=-U_m$ и без переключения знака управления перемещается до желаемого состояния $M_{жс}(+G_{жс}, 0)$ в течение времени $t_{жс}$. При этом условия рассмотрим «попятное» движение изображающей точки $q(G)$ из конечного состояния в это исходное положение ($G_0 > G_{жс}, q_0$). С этой целью введем «обратное время» - переменную $\tau = t_{жс} - t$. Тогда начальные условия при $\tau = 0$ примут значения:

$$G(\tau = 0) = G_{жс}, q(\tau = 0) = 0.$$

В «обратном времени» при $\tau = t_{жс} - t$ уравнение газодинамических процессов (1) при $U=-U_m$ примет вид:

$$T \frac{dq}{d\tau} - q = -2U_m T. \quad (2)$$

Переходя в уравнении (1) к «попятному движению» (при $t = t_{жс} - \tau$), получим:

$$G(\tau) = G_{жс} + U_m \tau. \quad (3)$$

Отсюда следует, что

$$\tau = (G - G_{жс})/U_m. \quad (4)$$

Решение уравнения (2) при $q(\tau = 0) = 0$ в «обратном времени» имеет вид:

$$q(\tau) = 2 \cdot T \cdot U_m \cdot (1 - e^{\tau/T}). \quad (5)$$

Подставив (4) в (5) получим уравнение движения изображающей точки системы в фазовой плоскости ($G - q$):

$$q(G) = 2 \cdot U_m \cdot (e^{(G-G_{жс})/U_m} - 1). \quad (6)$$

где $U_m = T \cdot U$.

При отрицательном управляющем воздействии (6) имеет вид:

$$q_o(G) = -2 \cdot U_m \cdot (1 - e^{(G-G_{жс})/U_m}). \quad (7)$$

Аналогично, при положительном управляющем воздействии имеем:

$$q_p(G) = 2 \cdot U_m \cdot (1 - e^{-(G-G_{жс})/U_m}). \quad (8)$$

Оптимальный по быстродействию алгоритм управления сводится к определению точки реверса управляющего воздействия в плоскости ($G-q$). Очевидно, что с этой целью необходимо принять:

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

где $q_{fn} = (q - q_{ln})$ – функция переключения знака управления;

q_{ln} – уравнение линии переключения знака управления в плоскости ($G-q$);

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

Структура разработанной замкнутой системы управления показана на рис.1.

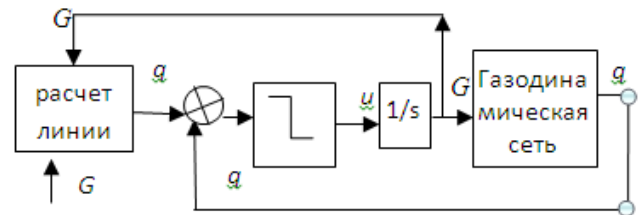


Рисунок 1 – Структура замкнутой системы оптимального по быстродействию управления проветриванием участка

Разработка модели для исследования алгоритма оптимального управления проветриванием выемочного участка

В настоящее время наиболее предпочтительной средой для исследования систем управления является среда MatLab, в основном благодаря специализированной библиотеке Control Toolbox и возможностям своего приложения - пакета Simulink, который в последние годы стал наиболее широко используемым средством для моделирования и анализа динамических систем. Важнейшим достоинством Simulink'a является предоставление графического интерфейса для построения моделей в виде блочных диаграмм. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. Несомненное преимущество Simulink заключается также в том, что он позволяет пополнять библиотеки блоков с помощью подпрограмм, написанных как на языке MatLab, так и на языках C, Fortran и Ada. Кроме того, он позволяет расширять свои возможности с помощью механизма S-функций.

Общая алгоритмическая модель контура регулирования расхода воздуха на участке и газодинамическая модель участка в среде MatLab, показана на рис. 2.

Предполагается, что конечное желаемое состояние участка и его параметры в системе управления проветриванием задаются извне (например, диспетчером). Ядром блока

управления является вычислительное цифровое устройство управления, которое реализовано на основе блока Function.

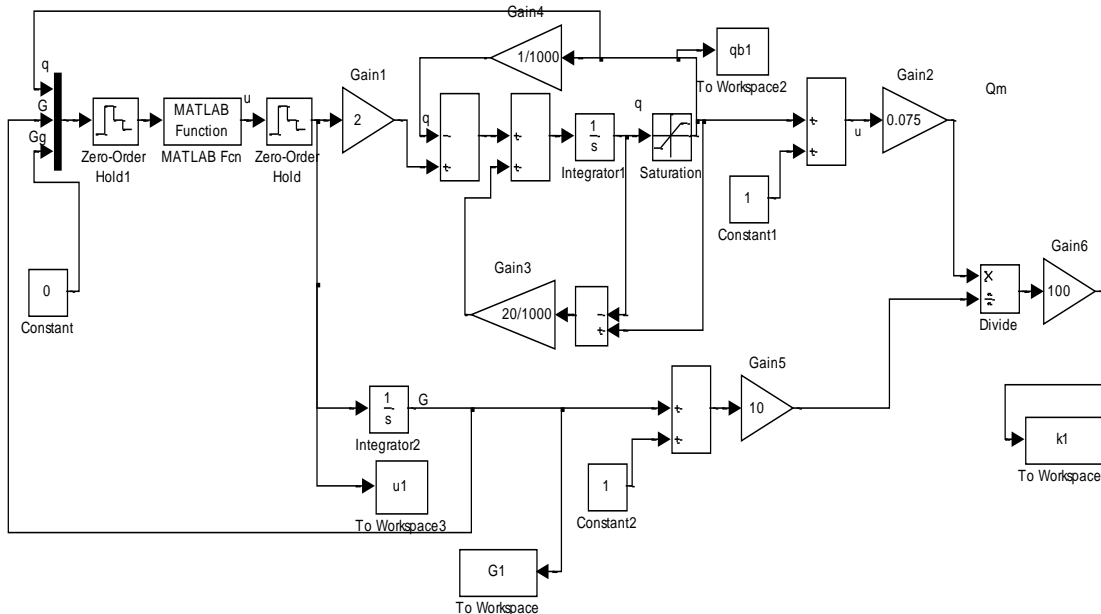


Рисунок 2. Аналого-цифровая модель оптимального по быстродействию контура регулирования проветривания на участке и газодинамическая модель участка

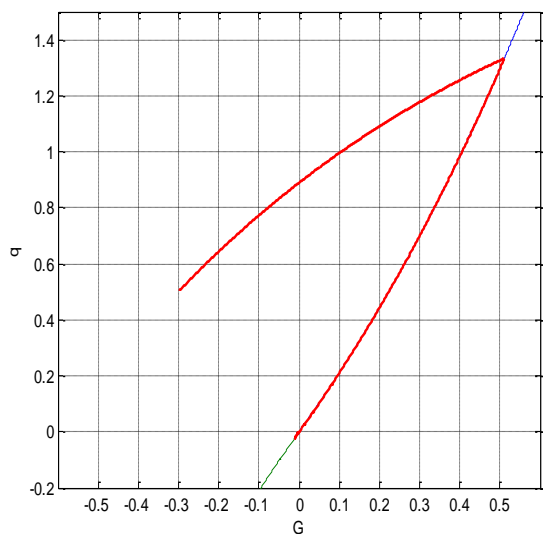
Аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи в модели системы управления реализованы на основе блоков ZOH. Вычислительный блок в зависимости от начальных условий и желаемого конечного состояния участка формирует (с периодом квантования $1c$.) в каждой точке фазовых траекторий требуемое предельное значение управляющего воздействия $\pm Um$. 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 газодинамической модели использованы блоки одностороннего насыщения (блок Saturation). При этом для исключения снижения интегральной составляющей сигнала $q(t)$ на входе блока одностороннего насыщения ниже предельного значения $q^{\min}(t) = -1$ в модели использована цепочка обратных связей, 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). Следовательно, в газодинамической модели участка гарантируется адекватное отображение физических свойств процессов газовыделения из выработанного пространства при реверсе скорости изменения расхода воздуха.

На рис. 3, 4 показаны оптимальные по быстродействию фазовые и временные траектории при отработке желаемого режима проветривания: $G_{жк} = 0$ и $q_{жк} = 0$. Постоянная времени в модели принималась равной среднему для участков значению $T = 1000c$.

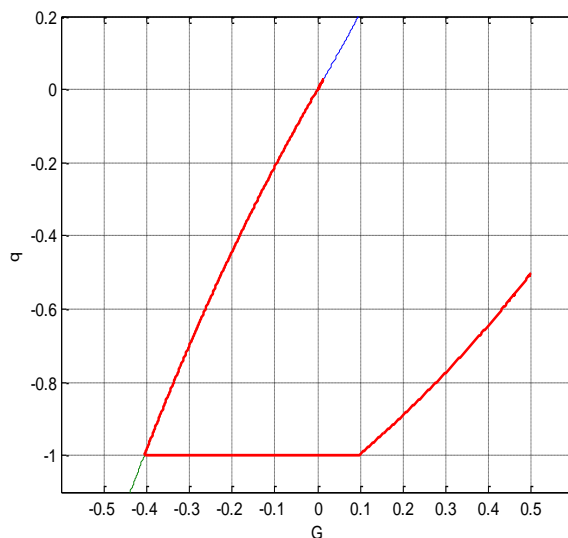
На рис. 3 начальный режим проветривания участка соответствует состоянию изображающей точки выше линии переключения ($G_0 = -0.3, q_0 = 0.5$). Поэтому на первом этапе подается управление $U = +U_m = 10^{-3}$, а реверс знака управления происходит при $q_{фн} = q - q_0(G) = 0$, т.е. при достижении линии переключения (7).

На рис. 4 исходное состояние изображающей точки – ниже линии переключения ($G_0 = 0.2, q_0 = -0.3$), поэтому сначала подается отрицательное управляющее воздействие. В процессе управления, как видно из рис.4, относительный дебит метана принимает минимальное граничное значение ($q(t) = -1$) и изображающая точка движется по прямой $q(G) = -1$ до линии переключения, и затем с инверсией знака управления достигает желаемого состояния.

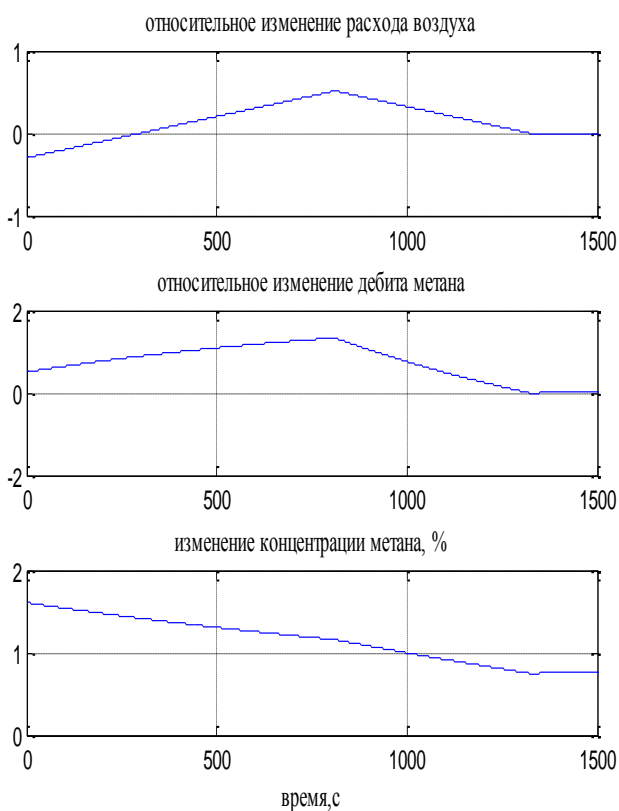
На рис.3, 4 показаны также временные зависимости расхода воздуха, дебита и концентрации метана. Заметим, что при принятой постоянной времени $1000 c$. (для которой приводилось моделирование), при обычной установке $G_{жк}$ переходный процесс длится время $3 T \approx 3000c$. В разработанной оптимальной системе (рис.2,3) время регулирования значительно меньше и составляет примерно $1000c$.



а)



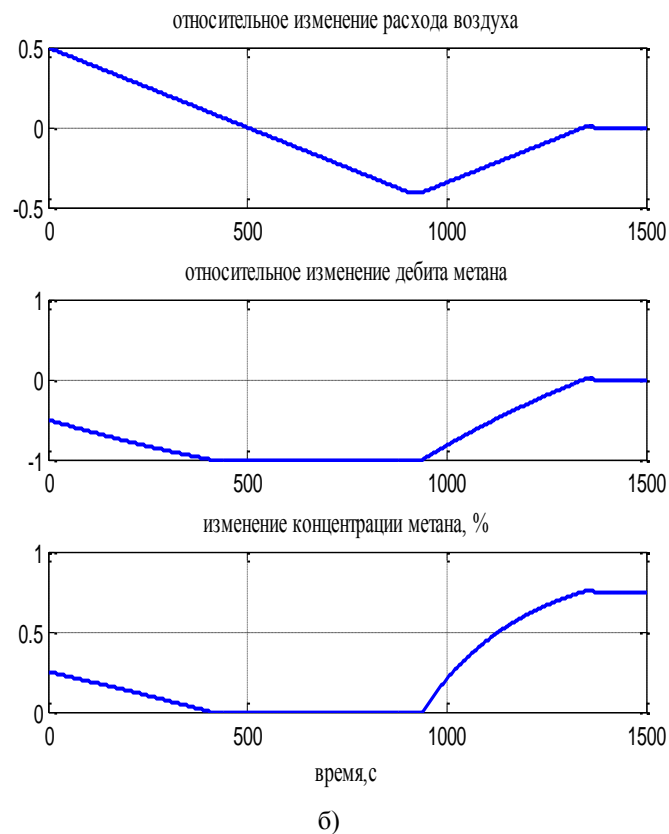
а)



б)

Рисунок 3 – Фазовые (а) и временные (б) траектории процесса управления.

Параметры модели: $G_0 = -0.3$, $q_0 = 0.5$,
 $G_{жс} = 0$, $q_{жс} = 0$, $T = 1000c$, $U_m = 1$



б)

Рисунок 4 – Фазовые (а) и временные (б) траектории процесса управления.

Параметры модели: $G_0 = 0.5$, $q_0 = -0.5$, $G_{жс} = 0$,
 $q_{жс} = 0$, $T = 1000c$, $U_m = 1$

Заключення

В роботі сформульована задача, побудована сигнум-функція і методом фазової площини розроблено алгоритм оптимального по швидкодії управління проветриванням виемочного участка угольної шахти. Розроблена структура замкнутої системи оптимального

управління. Результати моделювання алгоритма підтвердили його работоспособність і показали суттєве скорочення часу регулювання. Дальніші розробки пов'язані з модернізацією алгоритму управління для урахування обмеження однієї з фазових координат на допустимому рівні.

Список літератури

1. Абрамов Ф.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии / Абрамов Ф.А., Фельдман Л.П., Святной В.А. – К.: Наук. думка, 1981. – 284 с.
2. Лапко В.В. Синтез и исследование квазиоптимальных по быстродействию алгоритмов управления выемочным участком по газу с ограничением концентрации метана на расчетном уровне // В.В. Лапко, О.Ю. Чередникова // V міжнародна науково-практична конференція "Промислова безпека і вентиляція підземних споруджень в XXI сторіччі". – 21-22 квітня 2011р. – Донецьк. – С. 101 – 107.
3. Хайлов Е.Н. О поведении моментов переключения в линейной задаче быстродействия // Вест. Моск. ун-та. Сер.15. Вычисл. математика и кибернетика. - 1988. - N 4. - С.65-67.
4. Ногин В.Д. Введение в оптимальное управление. Учебно-методическое пособие. – СПб: Из-во «ЮТАС», 2008, 92с.

Надійшла до редколегії 10.06.2013

О.Ю. ЧЕРЕДНИКОВА

Донецький національний технічний університет

СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ШВИДКОДІЄЮ КЕРУВАННЯ

Розглядається синтез оптимального за швидкодією керування об'єктом другого порядку. 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 оптимального за швидкодією керування методом фазової площини, побудована сигнум-функція, розроблена структура замкнутої системи оптимального управління. Виконані експериментальні дослідження системи методом математичного моделювання.

Ключові слова: *оптимальне керування, фазова площина, моделювання, керування провітрюванням.*

О.Ю. CHEREDNIKOVA

Donetsk National Technical University

SYNTHESIS AND RESEARCH OF ALGORITHMS OF SPEED-OPTIMAL CONTROL

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 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, because of what the excavation area is a no minimum-phase object, which complicates the control algorithms. To simplify the problem, it is suggested to pass to methane yield control defined by the product of the methane concentration and air flow rate. In this case, the object is the minimum-phase dynamic system.

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-optimal control 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.

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 the modernization of the control algorithm for the effect of a restriction of one of the phase coordinates at the acceptable level.

Keywords: *optimal performance, the phase plane, modeling, control of airing.*