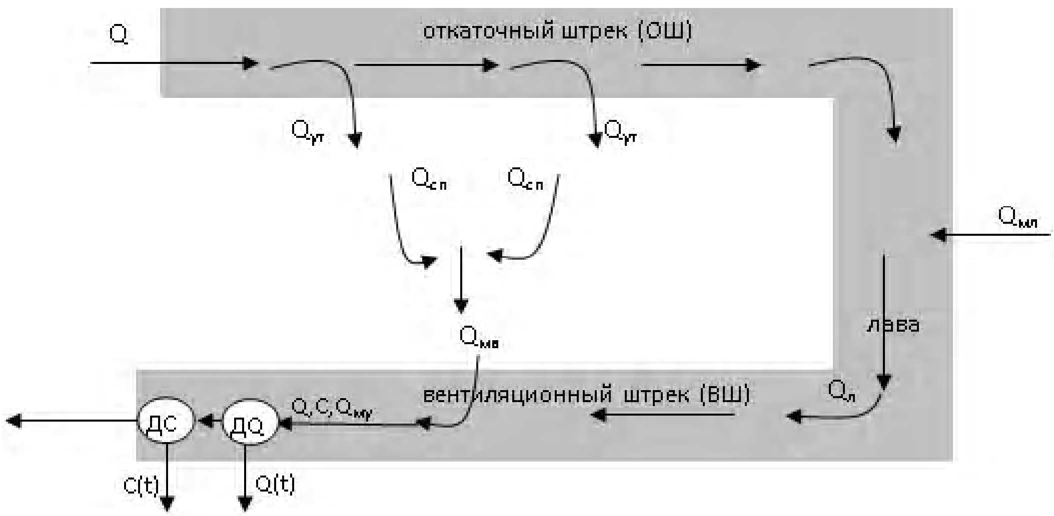

Рис. 1. Обобщенная схема движения газовоздушной смеси в выработках и выработанном пространстве выемочного участка: Q – дебит воздуха на участке; C – концентрация метана в исходящей струе участка; $Q_{сп}$ – дебит метана из спутника; $Q_{мв}$ – общий дебит метана из выработанного пространства; $Q_{му}$ – 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

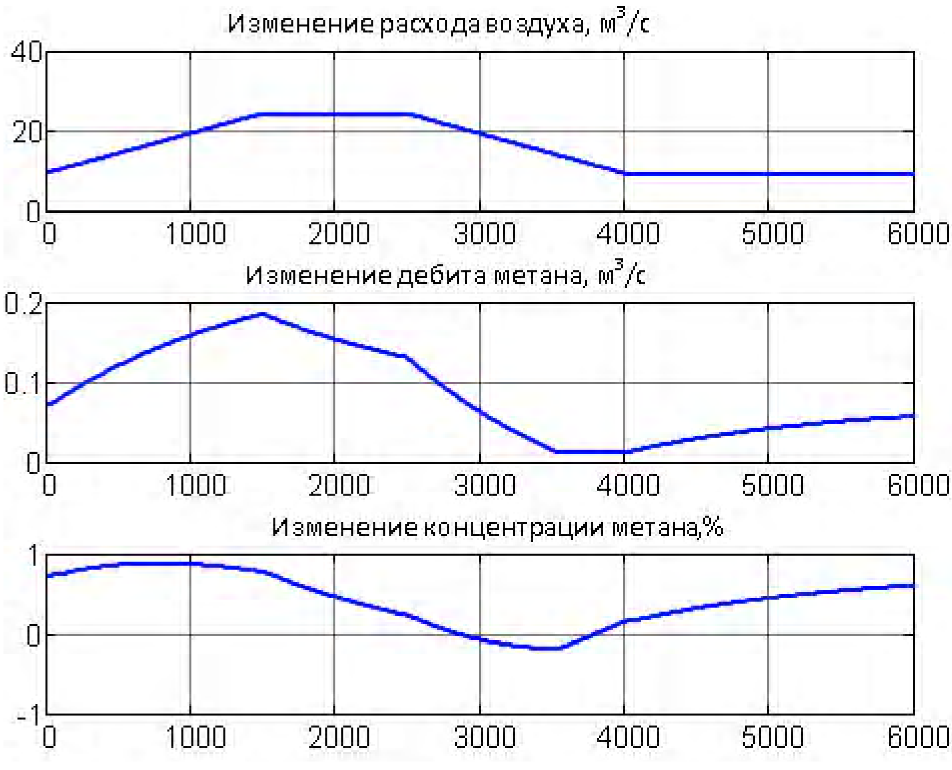

Рис. 2. Графики переходных аэрогазодинамических процессов на участке при изменении режима проветривания

ной длительности 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. 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 продолжительного 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, позволяющей автоматически обеспечивать отработку расчетного режима вентиляции рабочего пространства участка за минимально возможное время. В силу этого, в качестве цели в данной статье 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 выражением

$$Q_{му}=Q_{мв}+Q_{мл}. \quad (1)$$

Для относительных безразмерных приращений уравнение (1) принимает вид

$$q(t) = \theta_л \, q_л(t) + \theta_в \, q_в(t), \quad (2)$$

где $q = (Q_{му} - Q_{ому}) / Q_{ому}$, $q_в = (Q_{мв} - Q_{омв}) / Q_{омв}$, $q_л = (Q_{мл} - Q_{омл}) / Q_{омл}$ – соответственное приращение дебита метана соответственно на участке, из выработанного пространства и из лавы; $\theta_л = Q_{0мл} / Q_{0му}$; $\theta_в = Q_{0мв} / Q_{0му}$; $Q_{ому}$, $Q_{омл}$, $Q_{омв}$ – 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, выносимого утечками воздуха, описывается зависимостью [3]

$$\frac{dq_в}{dt} + \frac{1}{T_в} q_в = m \frac{dG}{dt}, \quad (3)$$

где m – коэффициент турбулентности выработанного пространства; $T_в$ – 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 ($q_л$=0). В силу этого, согласно (2), (3) движение объекта будет описываться уравнением

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{T_в} q = m\theta_в U. \quad (5)$$

Проведем оптимизацию процессов перехода от исходного режима проветривания ($G_н$, $q_н$) в желаемое состояние ($G_ж$, $q_ж$) 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 $[-5\cdot10^{-3}; 5\cdot10^{-3}]$ $с^{-1}$. 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, $G_ж$) [4] по уравнению

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

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

где $\tau = t_ж - t$; $t_ж$ – время оптимального процесса; τ – «обратное» время.

По решению системы (6), (7) при $U=\pm U_m$ получим

$$q_{лп}(G) = \theta_в \cdot m \cdot T_в \cdot U_m \cdot (\exp(\text{sign}(\lambda)\lambda/(T_в U)-1)), \quad (8)$$

где $\lambda = G - G_ж$.

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

$$\varphi = q - q_{лп}; \quad (9)$$

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

В законе оптимального управления по газу (8–10) использован неизмеряемый объем газа q на выходе объекта. 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]

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

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

В первом приближении выражение (11) может быть представлено уравнением

$$T_{\text{вш}}\frac{dk}{dt}+k=q-G\,,$$

где $T_{\text{вш}}=V_{\text{вш}}/Q_0$ – время однократного обмена воздуха во всем объеме перемешивания метановоздушной массы; $k=(C\text{–}C_0)\,/\,C_0$ – 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

$$q=T_{\text{вш}}\,dk\big/dt+k+G\,. \qquad (12)$$

В выражении (12) производная *dk/dt* является ненаблюдаемой величиной, поэтому для оценки реального значения производной *dk/dt* используем в блоке наблюдателя (рис. 3) уравнение

$$T_{\text{ф}}\,dx\big/dt+x=k(t)\,, \qquad (13)$$

где $T_{\text{ф}}$ – постоянная времени фильтра.

При этом для исключения существенного влияния инерционности фильтра на динамику системы управления примем постоянную времени фильтра значительно меньшей постоянной времени по газу $T_{\text{в}}$ ($T_{\text{в}}\approx 2000$ 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

$$\bar{q}=T_{\text{вш}}\frac{dx}{dt}+k+G\,.$$

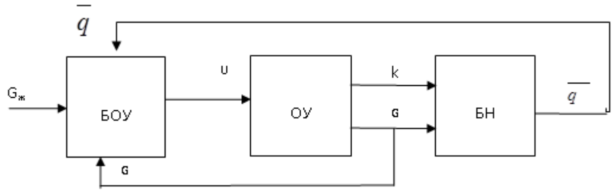

Рис. 3. Функциональная схема системы оптимального управления проветриванием выемочного участка, где БОУ – блок оптимального управления; ОУ – объект управления; БН – блок наблюдателя

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЗАДАННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОБЪЕКТА

Апробация алгоритма управления осуществлялась для выемочного участка, физические параметры которого характерны для метанообильных шахт Донбасса [3]. При этом постоянная времени фильтра в модельном эксперименте принималась равной $T_{\text{ф}}=10$ с (рис. 4). Графики переходных процессов отображают временные зависимости процессов управления (рис. 4, *а*) и фазовые траектории процесса управления в системе фазовых координат (*q–G*) и (*k–G*) (рис. 4, *б*). Начальное положение изображающей точки в фазовой плоскости (*q–G*) (0, –0,5) представляет собой некоторый исходный стационарный режим проветривания на участке, соответствующем точке (0,5, –0,5) в плоскости (*k–G*). В момент времени (t=50 с) по заданию диспетчера вентиляционной службы включается автоматический режим отработки заданного дебита воздуха на участке $G_{\text{ж}}=0{,}5$. По завершении переходного процесса на участке устанавливается заданный расход воздуха и новые значения относительной 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 при ее достижении знак управляющего воздействия инвертируется. После этого изображающая точка движется вдоль линии переключения и достигает конечного состояния (0, 0,5) в плоскости (*q–G*) и соответственно состояния (–0,5, 0,5) в плоскости (*k–G*). При этом процесс установления заданного режима яв-

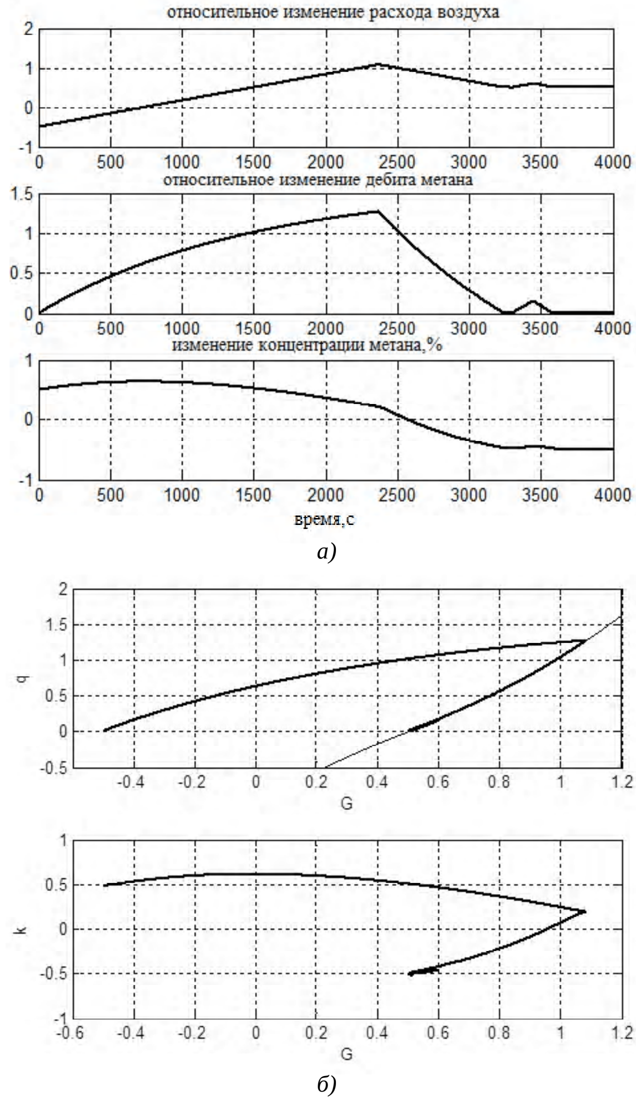

Рис. 4. Процессы управления при установлении желаемого расхода воздуха $G_{\text{ж}}=0{,}5$

ляется слабо колебательным, однако колебательные процессы происходят быстро по сравнению с процессами в объекте, т.е. колебания практически не влияют на динамику системы.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволяют рекомендовать для рассмотренных объектов со знакопеременной характеристикой при синтезе системы управления принцип оптимального по быстродействию управления с использованием в законе выработки управляющего воздействия промежуточной переменной объекта, вычисляемой по выходным координатам объекта, и не имеющей знакопеременной характеристики.

2. На примере системы периодического диспетчерского регулирования рудничной атмосферы угольных шахт показана работоспособность предложенной системы и достаточно высокая ее эффективность по быстродействию по сравнению с инерционностью объекта.

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 / Ф. А. Абрамов, Л. П. Фельдман, В. А. Святный. – 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 // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2013. – №1 (17). – С. 43–47.
5. *Фельдман, Л. П.* Уравнения неустановившегося движения метано-воздушной смеси в выработках и выработанном пространстве участка. / Л. П. Фельдман. – В кн. : Разработка месторождений полезных ископаемых. – К. : Техника, 1971. – Вып. 22. – С. 95–105.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2014.
Після доробки 28.04.2014.

Череднікова О. Ю.[1], Лапко В. В.[2]
[1]Канд. техн. наук, доцент, ДонНТУ, Україна
[2]Канд. техн. наук, доцент, ДонНТУ, Україна

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ЗА ШВИДКОДІЄЮ УПРАВЛІННЯ ОБ’ЄКТОМ ЗІ ЗНАКОЗМІННОЮ ПЕРЕХІДНОЮ ФУНКЦІЄЮ

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. Апробація розробленого управління виконана методами математичного моделювання. Показано, що запропонований закон управління забезпечує стійке управління та істотне прискорення відпрацювання заданого режиму роботи об’єкта.

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

Cherednikova O. YU.[1], Lapko V. V.[2]
[1]Ph. D., Associate Professor, DonNTU, Ukraine
[2]Ph. D., Associate Professor, DonNTU, Ukraine

SYNTHESIS OF SPEED-OPTIMAL CONTROL FOR THE OBJECT WITH AN ALTERNATING-SIGN TRANSITION FUNCTION

The synthesis of speed-optimal control for object with alternating-sign characteristic – excavation site of coal mines – was considered. The task comes to establishment of the desired mode of object operation with minimal time due to significant inertia process. Alternating-sign characteristic of methane concentration leads to release of methane, which complicates the synthesis of control system and complicates the control law. To improve the performance of control system the original new approach to the synthesis of the control law was proposed. For the control law it is proposed to use unipolar variable clearly identified at the regulated coordinate – methane concentration. Approbation 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 mode at the object. The results will be used in the aero-gas informational complex, implemented by 60 mines of Donbas.

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

REFERENCES

1. Solovnikov V. V. Raschet i proektirovanie analiticheskikh samonastraivayushhikhsya system s e’talonnyimi modelyami. Moskva, Mashinostroenie, 1972, 270 p.
2. Abramov F. A., Fel’dman L. P., Sviatnii V. A. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov rudnichnoj aerologii. Kiev, Naukova dumka, 1981, 284 p.
3. Lapko V. V., Cherednikova O. Yu. Matematicheskaya model’ i issledovanie perechodny’ch gazodinamicheskich processov na vy’emochny’ch uchastkach shacht Donbassa, *Visti Donetskoho girnychoho institutu: Vseukrainskii naukovo-technichnyi zhurnal girnuchoho profiliu*, Donetsk, 2008, No. 2, pp. 115–120.
4. Cherednikova O. Yu. Sintez i issledovanie algoritmov optimal’nogo po bystrodeystviyu upravlenia, Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universitetu, Seria Informatika, kibernetika ta obchyslyuvalna technika, No. 1, 2013, pp. 43–47.
5. Fel’dman L. P. Uravneniya neustanovivshegosya dvigeniya metano-vozdushnoi smesi v vy’robatkakh i vy’rabotannom prostranstve uchastka. V knige Razrabotka mestorozhdenij polezny’kh iskopaemy’kh. Kiev, Tekhnika, 1971, pp. 95–105.