

УДК 62-5, 681.5.015,004.942

О. Ю. Чередникова, Ю. С. Достлев

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»
83001, г. Донецк, ул. Артема, 58

СИНТЕЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНЫХ ПО ГАЗОВОМУ ФАКТОРУ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ УЧАСТКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

O. Yu. Cherednikova, Yu. S. Dostlev

State Educational Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University"
83001, c. Donetsk, Artema str, 58

SYNTHESIS AND MATHEMATICAL MODELING OF GAS-SAFE CONTROL SYSTEMS FOR VENTILATION OF COAL MINE SITES

О. Ю. Череднікова, Ю. С. Достлєв

Державна освітня установа вищої професійної освіти
«Донецький національний технічний університет»
83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58

СИНТЕЗ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗПЕЧНИХ ЗА ГАЗОВИМ ФАКТОРОМ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРОВІТРЮВАННЯМ ДІЛЯНОК ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Разработана методика аналитических исследований переходных процессов в системах управления проветриванием участков, обладающих дифференцирующими свойствами, при форсированном изменении режима проветривания. Обоснована устойчивость предложенной замкнутой системы управления проветриванием участков неминимально-фазового типа и определена область оптимальных настроек регулятора. Эффективность и корректность предложенных решений обоснована математическим моделированием систем управления проветриванием участков в типовых режимах работы.

Ключевые слова: моделирование, минимально-фазовый объект, система управления проветриванием.

A methodology has been developed for analytical studies of transient processes in ventilation control systems for areas that have differentiating properties, forcing a change in the ventilation regime. The stability of the proposed closed ventilation control system for non-minimal phase-type sections is substantiated, and the range of optimal regulator settings is determined. Efficiency and correctness of the proposed solutions is justified by the mathematical modeling of control systems for ventilating areas in typical operating modes.

Keywords: modeling, minimal-phase object, ventilation control system.

Розроблено методику аналітичних досліджень перехідних процесів у системах управління провітрюванням ділянок, що володіють диференціюючими властивостями, при форсованому зміні режиму провітрювання. Обґрунтовано стійкість запропонованої замкнутої системи управління провітрюванням ділянок немінимально-фазового типу і визначена область оптимальних налаштувань регулятора. Ефективність і коректність запропонованих рішень обґрунтована математичним моделюванням систем управління провітрюванням ділянок при типових режимах роботи.

Ключові слова: моделювання, мінімально-фазовий об'єкт, система управління провітрюванням.

Введение

Системы управления проветриванием участков являются наиболее важной составляющей частью системы управления безопасностью шахты. Поэтому созданию эффективных и простых систем управления проветриванием участков уделяется много внимания [1-8]. В результате проведенных исследований установлены основные свойства выемочных участков как объектов управления, разработаны математические модели динамики участков, созданы и испытаны исполнительные устройства регулирования режимов проветривания участков, разработаны и обоснованы алгоритмы диспетчерского управления проветриванием участков, обеспечивающие безопасное по газовому фактору управление проветриванием участков при достаточном запасе по концентрации в исходящей струе участков. Однако попытки создания безопасных по газовому фактору систем автоматического управления проветриванием участков до настоящего времени оказались безуспешными. В результате проведенных исследований было установлено, что в замкнутых системах управления проветриванием участков при использовании известных законов управления в общем случае не обеспечивается компенсация всплеска концентрации метана относительно начального уровня при регулировании режимов проветривания участков и, следовательно, ограничение на допустимом уровне концентрации метана.

Данная работа посвящена решению этой научной задачи – разработке безопасных по газовому фактору систем автоматического управления проветриванием выемочных участков.

Математическое описание и исследование выемочных участков как объектов управления концентрацией метана

Многочисленными шахтными наблюдениями и теоретическими исследованиями установлено, что в динамическом отношении переходные процессы по концентрации метана в исходящей струе участков обладают либо минимально – фазовыми, либо неминимально-фазовыми свойствами [1], [2], [5], [6], [11]. Шахтными наблюдениями установлено, что при изменении режима проветривания участков минимально-фазового типа концентрация метана в исходящей струе участка изменяется в одном направлении – в направлении конечного стационарного состояния.

Отмеченная взаимосвязь концентрации метана и расхода воздуха на участках этого типа в переходном и стационарном состояниях описывается дифференциальным уравнением [5], [6], [9]:

$$T_B \cdot \left(\frac{dS}{dt} \right) + S = -T_B^M \cdot \left(\frac{dG}{dt} \right) - G, \quad (1)$$

где $S = (C - C_0) / C_0$ – относительное значение концентрации метана в исходящей струе участка, C и C_0 – соответственно текущее и начальное значения концентрации метана;

$T_B = V_B / Q_B$ – время однократного обмена воздуха в активно проветриваемой зоне выработанного пространства участка, V_B – объем активно проветриваемой зоны выработанного пространства, Q_B – дебит утечек воздуха через выработанное пространство; $T_B^M = (1 - \alpha) \cdot T_B$, $\alpha = \Theta * N$, $N = \frac{2}{n}$, n – показатель степени турбулентности воздушного потока в выработанном пространстве, $\Theta = Q_{OMB} / (Q_{OMB} + Q_{ML})$ –

относительное значение дебита метана из выработанного пространства в исходящей струе участка, Q_{OMB} – дебит метана в выработанном пространстве из спутников разрабатываемого пласта, Q_{ML} – дебит метана из груди забоя лавы выемочного участка; t – время; $G = (Q - Q_0) / Q_0$ – относительное безразмерное значение дебита воздуха на участке, Q и Q_0 – соответственно текущее и исходное значения расхода воздуха на участке.

При аналитическом описании характерных свойств участков минимально-фазового типа будем предполагать, что до начала регулирования участок находится в стационарном штатном режиме:

$$S(t < 0) = 0, G(t < 0) = 0. \quad (2)$$

Уравнение динамики участка (1) для исследования переходных процессов представим в виде

$$d(T_B S + T_B^M G) / dt = -G - S.$$

При форсированном изменении расхода воздуха на участке соотношение имеет смысл при выполнении условия:

$$d(T_B S(0) + T_B^M \cdot G^*) / dt = 0, \quad (3)$$

где $S(0) = S(t=0)$ – начальное изменение концентрации метана в исходящей струе участка вначале переходного процесса (при $t = 0$) в момент скачкообразного изменения дебита воздуха на участке $G(t = 0) = (0 \rightarrow G^*)$, G^* – желаемый уровень расхода воздуха.

Следовательно, вначале переходного процесса при $t = 0$, согласно (3), имеем

$$S(0) = -(T_B^M / T_B) \cdot G^*. \quad (4)$$

После установления желаемого дебита воздуха

$$G(t > 0) = G^* \text{ и } dG/dt = dG^*/dt = 0,$$

согласно (1), переходной процесс по концентрации метана при $t > 0$ описывается соотношениями

$$\begin{aligned} T_B (dS/dt) + S &= -G^*, \\ S(t = 0) = S(0) &= -(T_B^M / T_B) \cdot G^*. \end{aligned} \quad (5)$$

Характеристическое уравнение однородного уравнения (5) описывается выражением [13]:

$$T_B \rho + 1 = 0. \quad (6)$$

Следовательно, решение однородного уравнения $T_B \cdot dS/dt + S = 0$, согласно (6), имеет вид:

$$S_{CB}(t) = A \cdot \exp(-t/T_B), \quad (7)$$

где A – постоянная интегрирования; $\rho = -(1/T_B)$ – корень характеристического уравнения (6) однородного уравнения (5), $S_{CB}(t)$ – свободная составляющая решения уравнения (5).

Частное решение уравнения (5) определяется равенством:

$$S_B(t) = -G^*, \quad (8)$$

где $S_B(t)$ – вынужденная составляющая решения (5).

В силу этого общее решение уравнения (5), согласно (7) и (8), определяется выражением:

$$S(t) = A \cdot \exp(-t/T_B) - G^* . \quad (9)$$

Используя соотношение (5), построим выражение для определения постоянной интегрирования A в уравнении (9):

$$S(t=0) = S(0) = A - G^* = -(T_B^M / T_B) \cdot G^* . \quad (10)$$

Откуда, согласно (10), получим:

$$A = -(T_B^M / T_B) \cdot G^* + G^* . \quad (11)$$

Следовательно, согласно (10) и (11), при резком изменении режима проветривания участка (5) концентрация метана в исходящей струе участка определяется выражением

$$S(t) = -(T_B^M / T_B) \cdot G^* \cdot \exp(-t/T_B) - G^* \cdot (1 - \exp(-t/T_B)) . \quad (12)$$

Таким образом, концентрация метана на выходе участка вначале переходного процесса при внезапном изменении режима проветривания скачком достигает уровня $-(T_B^M / T_B) \cdot G^*$, а затем по экспоненциальному закону устанавливается на расчетном конечном значении $S^* = -G^*$.

Временные диаграммы переходных процессов в исходящей струе участка показаны на рис.1. Концентрация метана в модели участка при скачкообразном изменении расхода воздуха в течение переходного процесса на выходе участка изменяется в соответствии с динамическими свойствами участка в одном направлении – адекватно и согласно полученной аналитической зависимости (12).

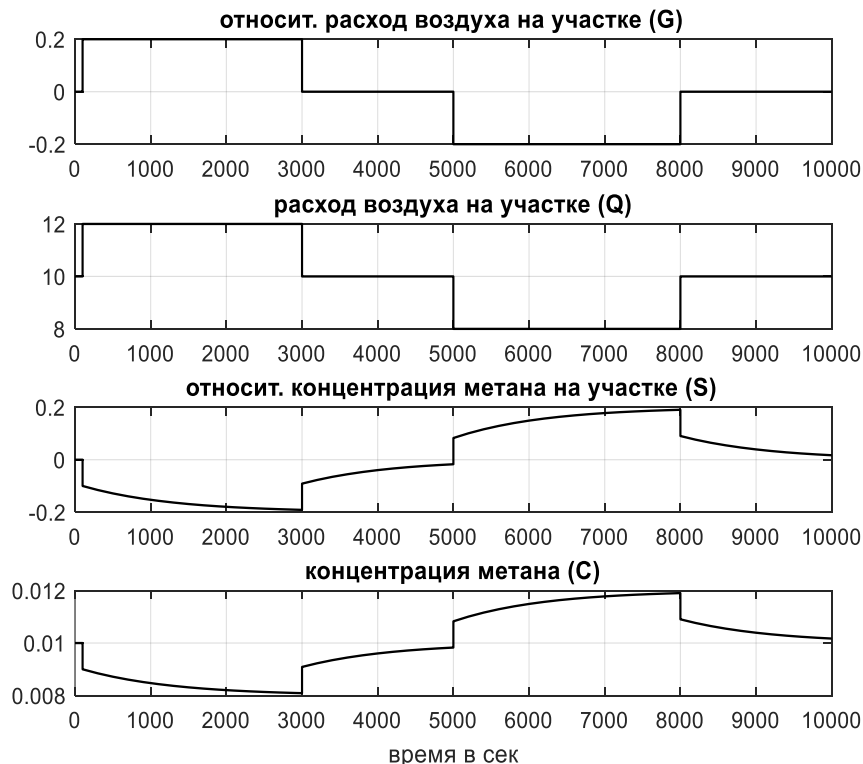


Рисунок 1 – Временные диаграммы процессов регулирования концентрации метана в исходящей струе участка минимально-фазового типа:

$$T_B = 1200\text{с}; \alpha = 0.5; Q_0 = 10\text{м}^3/\text{с}; C_0 = 0,01; G^* = +0,2$$

Шахтными наблюдениями установлено, что при смене режима проветривания участка неминимально-фазового типа концентрация метана в исходящей струе участка вначале переходного процесса отклоняется в направлении противоположном конечному приращению концентрации метана – вначале переходного процесса возникает нежелательный всплеск концентрации метана относительно исходного уровня при выполнении операции снижения исходного уровня концентрации метана. Отмеченная взаимосвязь концентрации метана и изменения расхода воздуха на участке этого типа описывается дифференциальным уравнением [11]:

$$T_B \cdot (dS/dt) + S = T_B^H \cdot (dG/dt) - G, \quad (13)$$

где $T_B^H = (\alpha - 1) \cdot T_B$, $\alpha = \Theta * N$, $N = 2 / n$, $1 < (\Theta \cdot N) < 2$.

При аналитическом анализе характерных свойств участков неминимально-фазового типа представим соотношение (13) в виде

$$d(T_B \cdot S - T_B^H \cdot G)/dt = -G - S. \quad (14)$$

При скачкообразном изменении расхода воздуха $G=(0 \rightarrow G^*)$ вначале переходного процесса при $t = 0$ соотношение (14) имеет смысл при выполнении условия:

$$T_B \cdot S(0) - T_B^H \cdot G^* = 0, \quad (15)$$

где $S(0) = S(t = 0)$; $G^* = G(t = 0)$.

Следовательно, вначале переходного процесса, согласно (15), при резком изменении расхода воздуха в исходящей струе участка возникает скачок концентрации метана

$$S(0) = (T_B^H / T_B) \cdot G^*, \quad (16)$$

После установления желаемого уровня дебита воздуха $G(t > 0) = G^*$ и $dG(t > 0) / dt = dG^* / dt = 0$, поэтому, согласно (13) и (15), переходной процесс в исходящей струе участка описывается соотношениями:

$$\begin{aligned} T_B \cdot (dS/dt) + S &= -G^*, \\ S(t = 0) &= S(0) = (T_B^H / T_B) \cdot G^*. \end{aligned} \quad (17)$$

Характеристическое уравнение однородного уравнения (17) описывается выражением (6), поэтому формула свободного движения системы (17) определяется соотношением (7). Частное решение уравнения (17) определяется соотношением (8). В силу этого общее решение уравнения (17) определяется выражением (9).

Следовательно, постоянная интегрирования A в уравнении (9) для участка неминимально-фазового типа, согласно (17), определяется соотношением

$$S(0) = A - G^* = (T_B^H / T_B) \cdot G^*. \quad (18)$$

Таким образом, согласно (18), получим:

$$A = G^* + (T_B^H / T_B) \cdot G^*. \quad (19)$$

В силу этого, согласно (9) и (19), при резком изменении режима проветривания участка неминимально-фазового типа концентрация метана на выходе участка определяется выражением

$$S(t > 0) = (T_B^H / T_B) \cdot G^* \cdot \exp(-t/T_B) - G^* \cdot (1 - \exp(-t/T_B)). \quad (20)$$

Таким образом, при форсированном изменении режима проветривания участка (13) на выходе участка вначале переходного процесса (при $t = 0$) концентрация метана скачком достигает уровня $[(T_B^H / T_B) \cdot G^*]$, а затем постепенно изменяет направление движения и в стационарном состоянии достигает конечного значения $S(t \rightarrow \infty) = -G^*$. Следовательно, отклонение концентрации относительно исходного уровня носит знакопеременный характер:

$$\text{Sign}[S(t = 0) = (T_B^H / T_B) \cdot G^*] \neq \text{Sign}[S(t \rightarrow \infty) = -G^*]. \quad (21)$$

Временные диаграммы процессов регулирования режимов проветривания на участке неминимально-фазового типа показаны на рис. 2. При скачкообразном изменении расхода воздуха на временных диаграммах модели участка изменение концентрации метана относительно исходного уровня соответствует динамическим свойствам участка и носит знакопеременный характер – адекватно и согласно полученным аналитическим зависимостям (20) и (21).

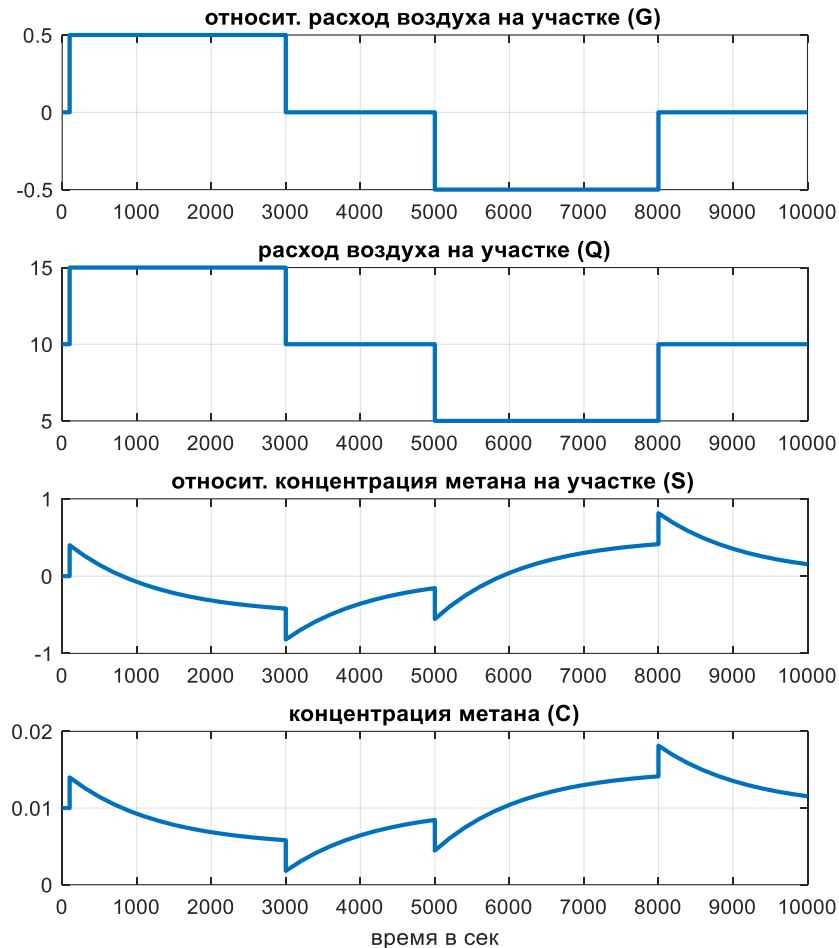


Рисунок 2 – Временные диаграммы процессов регулирования концентрации метана в исходящей струе участка неминимально-фазового типа:

$$T_B = 1200\text{с}; \alpha = 1,8; T_B^H = 960\text{с}; \\ Q_0 = 10\text{м}^3/\text{с}; C_0 = 0,01; G^* = \pm 0,5.$$

Синтез и математическое моделирование безопасных по газовому фактору систем управления проветриванием выемочных участков минимально-фазового типа

Для реализации безопасных по газовому фактору режимов работы в системах управления проветриванием участков минимально-фазового типа (рис.3) используем закон управления:

$$G = S - 2 \cdot Sz, \quad (22)$$

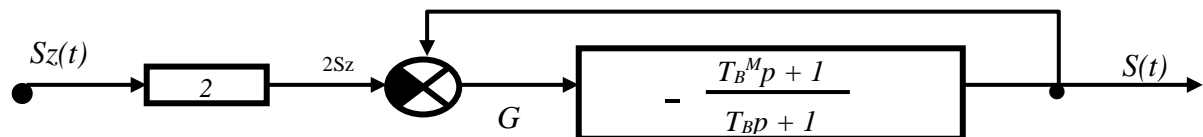


Рисунок 3 – Безопасная по газовому фактору схема управления проветриванием участков минимально-фазового типа

где Sz – заданное значение концентрации метана на выходе участка.

Тогда в замкнутой системе управления (рис. 3) переходные процессы будут описываться системой соотношений:

$$\begin{aligned} T_B \cdot (dS/dt) + S &= -T_B^M \cdot (dG/dt) - G; \\ G &= S - 2 \cdot Sz. \end{aligned}$$

Откуда следует, что в замкнутой системе управления (рис. 3) переходные процессы описываются дифференциальным уравнением

$$\frac{(T_B + T_B^M)}{2} \cdot \frac{dS}{dt} + S = T_B^M \cdot \left(\frac{dSz}{dt}\right) + Sz. \quad (23)$$

Для аналитического исследования динамических характеристик системы управления (22) соотношение (23) представим равносильным выражением

$$d\left(\left(\frac{T_B + T_B^M}{2}\right) \cdot S - T_B^M \cdot Sz\right) = Sz - S. \quad (24)$$

При скачкообразном изменении задающего воздействия $Sz(t=0) = (0 \rightarrow S^*)$ в точке разрыва производной (dSz/dt) выражение (24) имеет смысл при

$$d\left(\left(\frac{T_B + T_B^M}{2}\right) \cdot S(t=0) - T_B^M \cdot S^*\right) = 0. \quad (25)$$

Таким образом, согласно (25), в точке разрыва производной (dSz/dt) в начальный момент времени переходного процесса (при $t=0$) на выходе участка формируется приращение концентрации метана:

$$S(t=0) = S(0) = \left(\frac{2 \cdot T_B^M}{T_B + T_B^M}\right) \cdot S^*, \quad (26)$$

где $\left(\frac{2 \cdot T_B^M}{T_B + T_B^M}\right) < 1$.

В дальнейшем при $t > 0$ и неизменном значении задающего воздействия $Sz(t > 0) = S^*$ и $dSz/dt = 0$ переходные процессы в системе управления (рис. 3) определяются дифференциальным уравнением:

$$T_B \cdot (dS/dt) + S = S^*, \quad (27)$$

где $S(0) = 2 \cdot T_B^M / (T_B + T_B^M)$.

Общее решение уравнения (27), согласно (7) и (8), описывается выражением [13]:

$$S(t) = 2 \cdot T_B^M / (T_B + T_B^M) \cdot S^* \cdot \exp(-t/T_B) + S^* \cdot (1 - \exp(-t/T_B)) \quad (28)$$

Откуда вытекает, что в системе управления (22) $S(t \rightarrow \infty) \rightarrow S^*$. Следовательно, замкнутая система управления (рис.3) корректно отрабатывает заданное значение S^* и является устойчивой. При этом вначале процесса регулирования на выходе участка происходит резкое изменение концентрации метана до уровня $(2 \cdot T_B^M / (T_B + T_B^M)) \cdot S^* < S^*$, который в последующем нарастает в том же направлении по экспоненциальному закону с постоянной времени T_B до заданного значения $S_z = S^*$.

Временные диаграммы процессов управления в замкнутой системе управления проветривания участка минимально-фазового типа показаны на рис. 4.

При скачкообразном изменении задающего воздействия на временных диаграммах в модели системы управления вначале возникает резкое изменение уровня концентрации метана относительно исходного уровня, а затем происходит постепенное нарастание концентрации метана в том же направлении до заданного конечного значения $S_z = S^*$ – адекватно и согласно полученному аналитическому описанию (28) переходных процессов в системе управления.

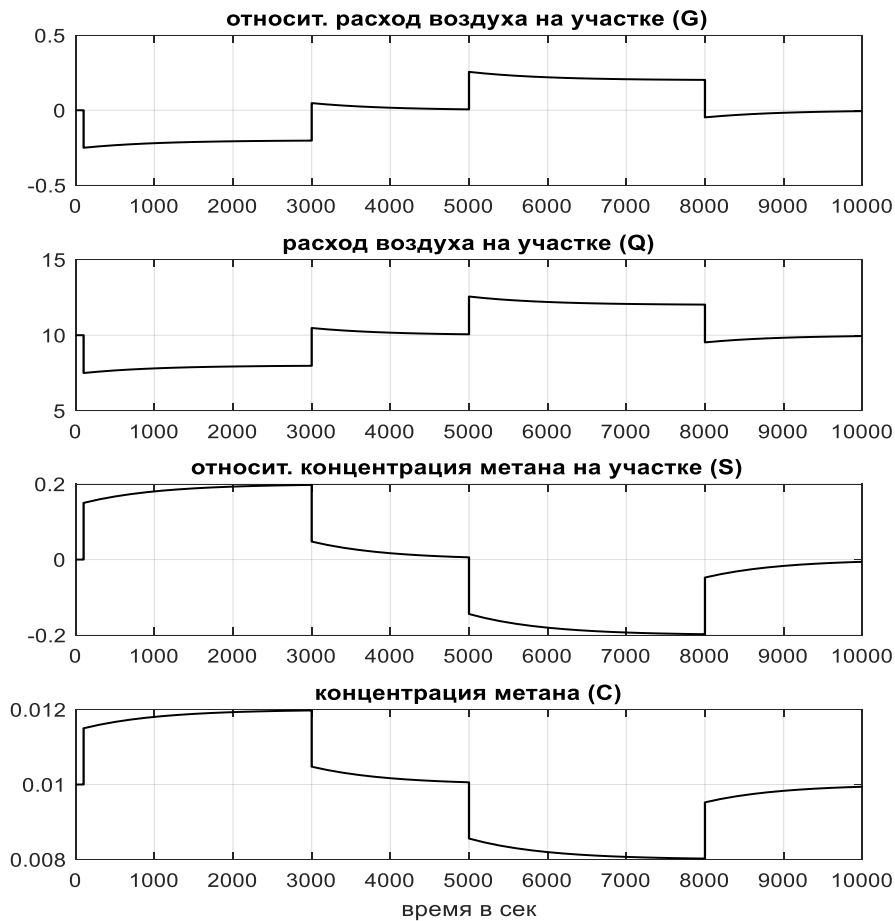


Рисунок 4 – Переходные процессы в системе управления проветриванием участка минимально – фазового типа: $\alpha = 0,6$; $T_B = 1200c$; $T_B^M = 720c$; $S_z = \pm 0,2$; $Q_0 = 10m^3/c$;

Синтез и математическое моделирование безопасных по газовому фактору систем управления проветриванием выемочных участков неминимально-фазового типа

Для реализации безопасных по газовому фактору режимов работы в системах управления проветриванием участков неминимально-фазового типа (рис.5) используем закон управления:

$$G_z = S - 2 \cdot S_z; G = (1 + Tp)G_z, \quad (29)$$

где G_z – заданное значение дебита воздуха на участке; $G(t)$ – текущее значение дебита воздуха на участке; T – постоянная времени регулятора.

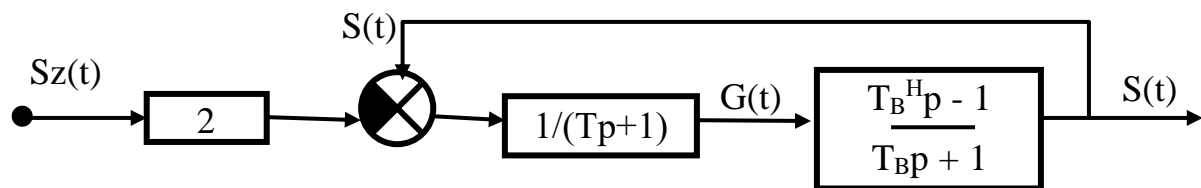


Рисунок 5 – Безопасная по газовому фактору схема системы управления проветриванием участков неминимально – фазового типа

В общем случае при назначенном законе управления (29) переходные процессы в системе управления (рис. 5) описываются соотношением:

$$S = \frac{T_B^H p - 1}{(T_B p + 1)(Tp + 1)} (S - 2S_z).$$

Откуда после очевидных преобразований получим:

$$S(T_B p + 1)(Tp + 1) = (T_B^H p - 1)S - 2(T_B^H p - 1)S_z.$$

Следовательно, переходные процессы в замкнутой системе управления проветриванием участков неминимально-фазового типа описываются соотношением:

$$(ap^2 + bp + 2)S = (2 - 2T_B^H p)S_z, \quad (30)$$

где $a = T_B T$; $b = T_B - T_B^H + T$.

Для обеспечения экспоненциального характера переходных процессов в системе управления (29) постоянные характеристического уравнения соотношения (30) должны удовлетворять неравенству [13]:

$$ap_p^2 + bp_p + 2 < 0, \quad (31)$$

где $p_p = (-b/2a)$ – значение параметра p характеристического уравнения, при котором выражение $y = ap^2 + bp + 2$ принимает экстремальное значение.

Таким образом, для обеспечения экспоненциального характера переходных процессов в системе управления (29), согласно (31), постоянная времени T регулятора должна удовлетворять неравенству $b^2 / 4a > 2$.

Следовательно, для исключения колебательного процесса в системе управления по постоянную времени регулятора (29), согласно (30), следует назначать, исходя из формулы

$$\frac{(2 - \theta N)^2 T_B}{T} + \frac{2 - \theta N}{2} + \frac{T}{4T_B} > 2. \quad (32)$$

Таким образом, в области реальных значений газодинамических параметров участков неминимально-фазового типа $\theta N \in (1; 2)$ [2,5].

Минимальная инерционность регулятора (29), согласно (32), составляет $T = 10 T_B$.

Корни характеристического уравнения системы управления (рис. 5) в этом случае, согласно (30), принимают значения:

$$p_1 = -1/T_1; p_2 = -1/T_2, \quad (33)$$

где $T_1 = 3,63 T_B$; $T_2 = 1,25 T_B$.

Для аналитического исследования и оценки качественных характеристик закона управления (29) при скачкообразном изменении задающего воздействия $S_z(t)$ представим соотношение (30) в виде

$$\frac{d}{dt} [T_B T \frac{dS}{dt} + (T_B - T_B^H + T)S + 2T_B^H S_z] = -2S + 2S_z. \quad (34)$$

В точке разрыва функции $S_z(t=0)=0 \rightarrow S^*$ выражение (34) имеет смысл при сохранении равенства

$$T_B \cdot T \cdot dS/dt(0) + (T_B - T_B^H + T) \cdot S(0) + 2 \cdot T_B^H \cdot S^* = 0, \quad (35)$$

где S^* – желаемое значение задающего воздействия S_z ; $dS/dt(0)$, $S(0)$ – состояния переменных в точке разрыва задающего воздействия (при $t = 0$).

Следовательно, в исходном состоянии системы $S(0)=0$, согласно (35), имеем:

$$dS/dt(0) = -2 \cdot T_B^H / (T_B \cdot T) \cdot S^*. \quad (36)$$

После переключения задающего воздействия $S_z(t>0) = S^* = const$. В силу этого переходные процессы в системе управления при $t>0$, согласно (30) и (36) описываются уравнением:

$$a \cdot d^2 S/dt^2 + b \cdot dS/dt + 2S = 2S^*, \quad (37)$$

где $S(0) = 0$; $dS/dt(0) = -2 \cdot T_B^H / (T_B \cdot T) \cdot S^*$.

Таким образом, при скачкообразном изменении задающего воздействия переходные процессы в системе управления (рис. 5) в общем случае, согласно (35) и (37), описываются формулой:

$$S(t) = A_1 \cdot \exp(-t/T_1) + A_2 \cdot \exp(-t/T_2) + S^*, \quad (38)$$

где A_1, A_2 – постоянные интегрирования.

При заданных начальных условиях, согласно (37) и (38), постоянные интегрирования A_1 и A_2 определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 + S^* &= S(0) = 0; \\ A_1/T_1 + A_2/T_2 &= 2T_B^H / T_B T. \end{aligned} \quad (39)$$

Следовательно, согласно (33) и (39), при типовых значениях газодинамических констант $2(\Theta N - 1) \approx 1$ имеем:

$$\begin{aligned} A_1 &= -T_1 \cdot (T + T_2) / T \cdot (T_1 - T_2) \cdot S^*; \\ A_2 &= T_2 \cdot (T + T_2) / T \cdot (T_1 - T_2) \cdot S^*. \end{aligned} \quad (40)$$

Таким образом, после переключения задающего воздействия, согласно (38) и (39), в системе управления (29) корректно и устойчиво обрабатывается в установившемся режиме желаемое значение концентрации метана $S(t \rightarrow \infty) = S^*$. При этом экстремальное значение концентрации метана формируется в момент времени $t = t_y$, определяемое, согласно (38), соотношением:

$$dS(t)/dt = 0 = -A_1/T_1 \cdot \exp(-t_y/T_1) - A_2/T_2 \cdot \exp(-t_y/T_2), \quad (41)$$

где t_y – экстремальное значение времени переходного процесса, при котором формируется максимальное значение всплеска концентрации метана.

Таким образом, в общем случае экстремум переходного процесса, согласно (41), определяется соотношением

$$t_y = \ln \left[(-A_1 T_2) / (A_2 T_1) \right] / (1/T_1 - 1/T_2). \quad (42)$$

При принятых значениях параметров регулятора (29), согласно (33), (38) и (42), экстремальное значение всплеска концентрации метана при обработке задающего воздействия $S_z = S^*$ составит:

$$S_y(t = t_y) = A_1 \exp(-t_y/T_1) + A_2 \exp(-t_y/T_2) + S^* = -0,012 S^* \text{ (или } 1,2\% S^* \text{),}$$

где $t_y = 0,24 T_B$, $T_B = 1200c$, S_y – экстремальное значение всплеска концентрации метана относительно исходного уровня концентрации метана $S(0) = 0$ при обработке задающего воздействия $S_z = S^* \neq \text{sign} S_y$.

Амплитуду всплеска концентрации метана в системе управления можно существенно понизить путем повышения инерционности регулятора (29) и, следовательно, увеличения длительности переходного процесса в системе управления. Например, при $T = 30 \cdot T_B$ имеем: $S_y(t = t_y) = -0,004 S^*$ или $0,4\% S^*$, где $t_y = 0,374 \cdot T_B$, $T_B = 1200c$, $T_1 = 14,2 \cdot T_B$, $T_2 = 1,057 \cdot T_B$, $A_1 = -1,112 \cdot S^*$, $A_2 = 0,112 \cdot S^*$.

Временные диаграммы переходных процессов безопасного по газовому фактору управления проветриванием участка неминимально-фазового типа показаны на рис. 6.

При форсированном изменении задающего воздействия на временных диаграммах модели происходит постепенное экспоненциальное изменение концентрации метана до конечного уровня $S_z = S^*$ – адекватно и согласно полученному аналитическому выражению (40). Следовательно, в предложенной системе управления проветриванием участков неминимально-фазового типа (рис. 5) при сохранении абсолютной устойчивости системы возможно снижение всплеска концентрации метана до сколь угодно малого уровня и таким образом обеспечиваются условия для создания безопасной по газу системы управления вентиляции в газовых шахтах.

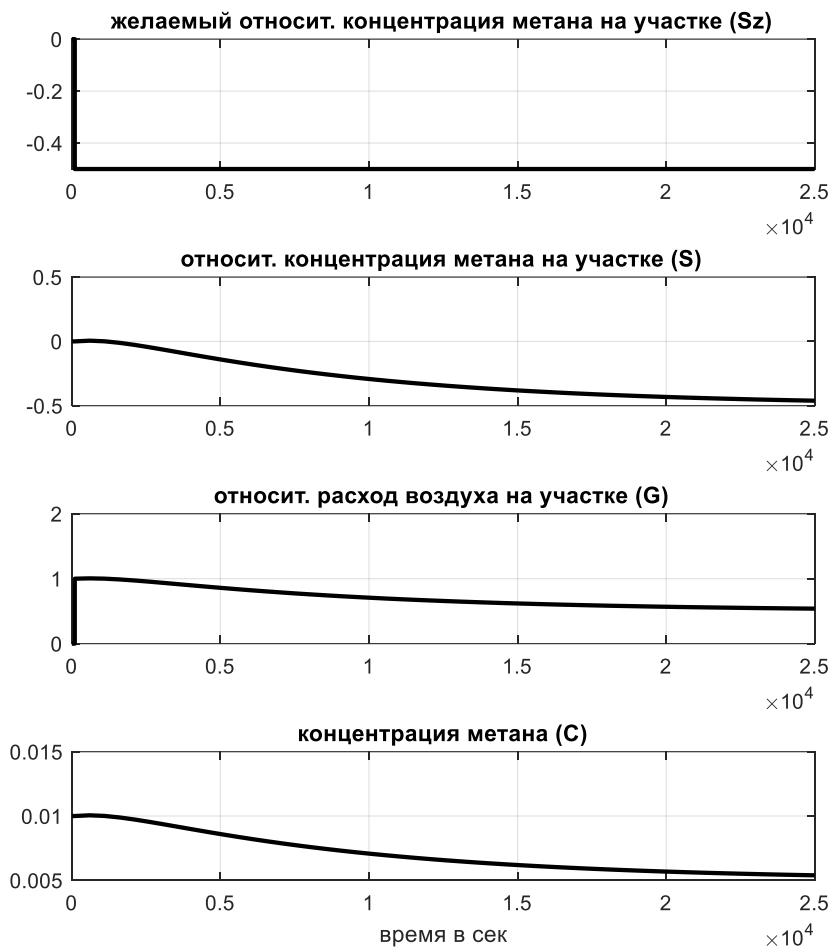


Рисунок 6 – Схема моделирования (а) и временные диаграммы (б) в безопасной по газовому фактору системе управления проветриванием участка неминимально-фазового типа: $T_B = 1200c$; $T = 10 \cdot T_B$; $T_B^H = (\alpha - 1) \cdot T_B = 600c$; $\alpha = 1.5$; $S_z = -0.5$; $C_0 = 0,01$

Выводы

Основные результаты работы сводятся к следующему:

- разработана методика аналитического исследования переходных процессов в системе управления проветриванием участков минимально- и неминимально-фазового типа при форсированном изменении режима проветривания;
- показано, что для реализации безопасных по газовому фактору режимов проветривания участков минимально-фазового типа необходимо и достаточно использовать управление по отклонению концентрации метана от заданного уровня;
- показано, что для реализации безопасных по газовому фактору режимов проветривания участков неминимально-фазового типа целесообразно и достаточно использовать инерционное звено, обеспечивающее ограничение всплеска концентрации на заданном уровне;
- аналитическими исследованиями динамики системы управления обоснована устойчивость предложенных способов управления проветриванием участков и определена область оптимальных настроек регулятора;
- эффективность и корректность предложенных решений обоснована математическим моделированием системы управления проветриванием участков в типовых режимах работы.

Список литературы

1. Абрамов Ф. А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии [Текст] / Абрамов Ф. А., Фельдман Л. П., Святный В. А. – К. : Наук. думка, 1981. – 284 с.
2. Пучков Л. А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт [Текст] / Л. А. Пучков, Л. А. Бахвалов. – М. : Недра, 1992. – 399 с.
3. Петров Н. Н. Методы синтеза систем автоматического регулирования вентиляторов главного проветривания [Текст] / Н. Н. Петров, П. Н. Ермолаев, П. Т. Пономарев // Автоматическое управление в горном деле : сб. научных трудов. – Новосибирск : ИГД СО АН СССР, 1971. – С. 23–49.
4. Святный В. А. Моделирование аэрогазодинамических процессов и разработка систем управления проветриванием шахт [Текст]: дисс. д-ра техн. наук: 05.13.07 / Святный Владимир Андреевич. – Донецк, 1985. – 440 с.
5. Фельдман Л. П. Исследование динамики и синтез систем автоматического управления технологическими процессами (угольная промышленность) [Текст] : дисс. доктора техн. наук: 05.13.07/ Фельдман Лев Петрович. – Донецк, 1974. – 395 с.
6. Лапко В. В. Математическая модель и исследование переходных газодинамических процессов на выемочных участках шахт Донбасса [Текст] / В. В. Лапко, О. Ю. Чередникова // Вести Донецкого горного института : Всеукраинский научно-технический журнал горного профиля. – Донецк : ДВУЗ «ДонНТУ». – № 2. – 2008. – С. 115–121.
7. Чередникова О. Ю. Математические модели аэрогазодинамических процессов и алгоритмы безопасного управления проветриванием выемочных участков угольных шахт [Текст] : дисс. канд. техн. наук : 05.13.07 / Чередникова Ольга Юрьевна. – 2013. – 214 с.
8. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления [Текст] / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб.; Профессия, 2003. – 752 с.

References

1. Abramov F.A., Feldman L.P., Svyatny V.A. *Modelirovaniye dinamicheskikh protsessov rudnichnoy aerologii* [Modeling of dynamic processes of mine aerology]. K., Science. dumka, 1981, 284 p.
2. Puchkov L.A. Bakhvalov L.A. *Metody i algoritmy avtomaticheskogo upravleniya provetrivaniyem ugol'nykh shakht* [Methods and algorithms for automatic control of the ventilation of coal mines], Moscow, Nedra, 1992, 399 p.
3. Petrov N. N., Ermolaev P. N., Ponomarev P. T. *Metody sinteza sistem avtomaticheskogo regulirovaniya ventilyatorov glavnogo provetrivaniya* [Methods of synthesis of automatic control systems for main ventilation fans]. *Avtomaticheskoye upravleniye v gornom dele : sb. nauchnykh trudov* [Automatic control in mining." Sat. scientific works], Novosibirsk, IGD SB AS USSR, 1971, pp. 23-49.
4. Svyatny V.A. *Modelirovaniye aerogazodinamicheskikh protsessov i razrabotka sistem upravleniya provetrivaniyem shakht* [Modeling of aerogasdynamic processes and development of control systems for ventilation of mines: diss. doctor of technical sciences], Sciences: 05.13.07, Donetsk, 1985, 440 p.
5. Feldman, L.P. *Issledovaniye dinamiki i sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami (ugol'naya promyshlennost')* [Research of dynamics and synthesis of systems of automatic control of technological processes (coal industry): diss. doctor of technical sciences], Sciences: 05.13.07, Donetsk, 1974, 395 p.
6. Lapko V.V. Cherednikova O.Yu. *Matematicheskaya model' i issledovaniye perekhodnykh gazodinamicheskikh protsessov na vyemochnykh uchastkakh shakht Donbassa* [Mathematical model and investigation of transient gas-dynamic processes at the excavation sites of the Donbass mines]. *Vesti Donetskogo gornogo instituta : Vseukrainskiy nauchno-tekhnicheskij zhurnal gornogo profilya* [News of Donetsk Mining Institute: All-Ukrainian scientific and technical magazine of mining profile], Donetsk, No. 2, 2008, pp. 115–121.
7. Cherednikova O.Yu. *Matematicheskiye modeli aerogazodinamicheskikh protsessov i algoritmy bezopasnogo upravleniya provetrivaniyem vyemochnykh uchastkov ugol'nykh shakht* [Mathematical models of the aerogasdynamic processes and algorithms for safe control of the winding of coal mine excavation sites: diss. Cand. tech]. Sciences: 05.13.07 , 2013, 214 p.
8. Besekersky V. A., Popov E. P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [The theory of automatic control systems], St. Petersburg; Profession, 2003, 752 p.

RESUME

O. Yu. Cherednikova, Yu. S. Dostlev

Synthesis and Mathematical Modeling of Gas-Safe Control Systems for Ventilation of Coal Mine Sites

Background: As a result of the conducted researches, the basic properties of the excavation sites as control objects were established, mathematical models of the dynamics of the sites were developed. However, attempts to create gas-safe systems for automatic control of the ventilation of areas have hitherto been unsuccessful. In general, there is no compensation for a burst of methane concentration relative to the initial level when regulating the ventilation modes of the sections.

Materials and methods: Observations in mines and theoretical studies have established that, in a dynamics, the transient processes for the concentration of methane in the outgoing jet of the sections have either minimal phase or non-minimal phase properties.

In the analytical description of the characteristic properties of the sites, it is taken into account that in the sections of the minimum-phase type, when the ventilation regime changes, the methane concentration in the outgoing jet of the section changes in one direction - in the direction of the final stationary state, in non-minimal phase-type sections, the methane concentration in the outgoing stream of the section at the beginning of the transient process there is a surge of methane concentration. With the help of modeling the validity of the obtained dependences was proved.

Results:

– developed a technique for the analytical study of transient processes in the ventilation control system of minimum- and non-minimal-phase phases with forced variation of the ventilation regime;

– Analytical studies of the dynamics of the control system are justified the stability of the proposed methods for controlling the ventilation of areas and determined the area of optimal settings of the regulator;

Conclusions: The proposed method for controlling the ventilation of areas can be recommended for use in control systems of objects of a non-minimal-phase type of another physical nature.

РЕЗЮМЕ

О. Ю. Чередникова, Ю. С. Достлев

Синтез и математическое моделирование безопасных по газовому фактору систем управления проветриванием участков угольных шахт

История вопроса: В результате проведенных исследований установлены основные свойства выемочных участков как объектов управления, разработаны математические модели динамики участков. Однако попытки создания безопасных по газовому фактору систем автоматического управления проветриванием участков до настоящего времени оказались безуспешными. В общем случае не обеспечивается компенсация всплеска концентрации метана относительно начального уровня при регулировании режимов проветривания участков.

Материалы и методы: Шахтными наблюдениями и теоретическими исследованиями установлено, что в динамическом отношении переходные процессы по концентрации метана в исходящей струе участков обладают либо минимально-фазовыми, либо неминимально-фазовыми свойствами.

При аналитическом описании характерных свойств участков учтено, что в участках минимально-фазового типа при изменении режима проветривания концентрация метана в исходящей струе участка изменяется в одном направлении – в направлении конечного стационарного состояния, в участках неминимально- фазового типа концентрация метана в исходящей струе участка вначале переходного процесса происходит всплеск концентрации метана. С помощью моделирования была доказана справедливость полученных зависимостей.

Результаты:

– разработана методика аналитического исследования переходных процессов в системе управления проветриванием участков минимально- и неминимально-фазового типа при форсированном изменении режима проветривания;

– аналитическими исследованиями динамики системы управления обоснована устойчивость предложенных способов управления проветриванием участков и определена область оптимальных настроек регулятора;

Заключение: Предложенный способ управления проветриванием участков может быть рекомендован для использования в системах управления объектами неминимально-фазового типа другой физической природы.

Статья поступила в редакцию 23.07.2018.