

УДК 62-5, 681.5.015, 004.942

## Исследование переходных процессов в системе управления проветриванием угольных шахт в выемочных участках неминимально-фазового типа

О. Ю. Чередникова, Ю. С. Достлев  
Донецкий национальный технический университет  
[olga.donntu@gmail.com](mailto:olga.donntu@gmail.com)

### Аннотация

*В системе управления воздухораспределением для установления желаемого режима проветривания на выемочных участках неминимально-фазового типа предложено использовать регулятор расхода воздуха в виде инерционного звена первого порядка. Аналитически определены оптимальные настройки регулятора расхода воздуха, при которых обеспечиваются устойчивость системы управления проветриванием участков неминимально-фазового типа, желаемая точность работы системы управления, безопасный характер переходных процессов при регулировании и стабилизации режимов проветривания участков. Достоверность проведенных аналитических исследований и работоспособность предложенных систем управления проветриванием участков подтверждена математическим моделированием.*

### Введение

Актуальность разработки надежной системы проветривания в шахтных выработках не подлежит сомнению. Однако задача автоматизации шахтной вентиляционной сети далека от решения. Одним из сдерживающих факторов является невозможность проведения натурных экспериментов из-за опасности для жизни горняков. Поэтому в настоящий момент проверка работоспособности предлагаемых алгоритмов и систем управления проводится моделированием.

Разработки ведутся не один десяток лет в России [1, 2] и на Донбассе [3, 5]. В результате проведенных исследований установлены основные свойства выемочных участков как объектов управления, разработаны математические модели динамики 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 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.

В настоящей работе предложена и

обоснована обобщенная структура системы управления проветриванием участков неминимально-фазового типа, обеспечивающая стабильную и безопасную работу системы вентиляции выемочных участков.

### Характеристика неминимально-фазовых участков

В динамическом отношении переходные процессы по концентрации метана в исходящей струе участков обладают либо минимально – фазовыми, либо неминимально-фазовыми свойствами [1-3, 5]. Именно участки неминимально-фазового типа создают проблемы при регулировании расхода воздуха.

Газодинамические свойства участков неминимально-фазового типа описываются дифференциальным уравнением [1]:

$$T \frac{dS}{dt} + S = \tau \frac{dG}{dt} - G, \quad (1)$$

где  $S = (C - C_o) / C_o$  – безразмерное относительное значение концентрации метана;

$G = (Q - Q_o) / Q_o$  – безразмерное относительное значение расхода воздуха на выходе участка;

$C_o, Q_o$  – концентрация участка и расход воздуха в установившемся режиме, соответственно;

$T$  – постоянная времени участка;

$\tau$  – коэффициент пропорциональности дифференцирующей составляющей расхода воздуха – управляющего воздействия.

Структурная схема аналоговой модели участка неминимально-фазового типа (1) показана на рис. 1 [5], на рис. 2 приведена ее функциональная схема.

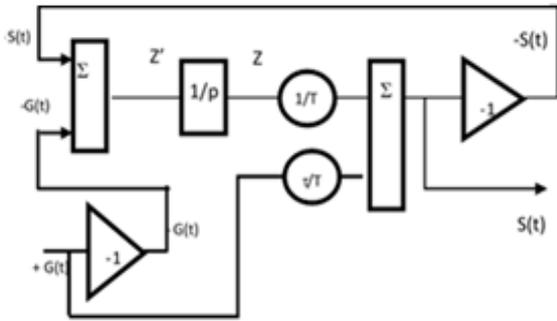


Рисунок 1 – Структурная схема аналоговой модели системы проветривания участков неминимально-фазового типа

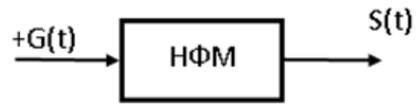


Рисунок 2 - Функциональная схема аналоговой модели системы

На рис. 3 показаны графики переходных процессов на участке при форсированном изменении расхода воздуха при увеличении дебита воздуха, а на рис. 4 - при его уменьшении. При форсированном изменении дебита воздуха на входе модели участка неминимально-фазового типа (рис.2, 3) на выходе участка происходит перерегулирование исходного уровня концентрации метана ( $S=0$ ) - в исходящей струе участка формируется всплеск концентрации метана, уровень которого в общем случае может превысить безопасный уровень концентрации метана.

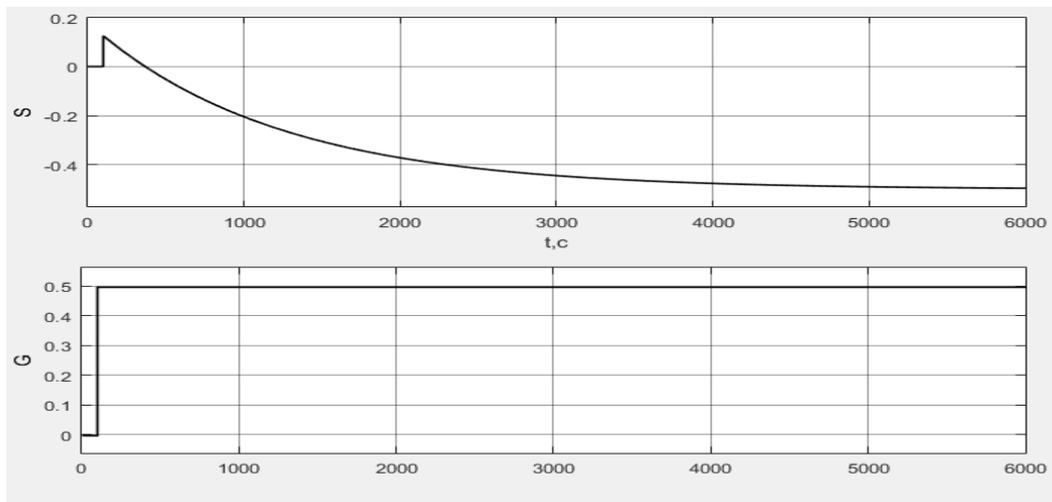


Рисунок 3 – Графики переходных процессов на участке неминимально-фазового типа (рис.1) при форсированном увеличении расхода воздуха

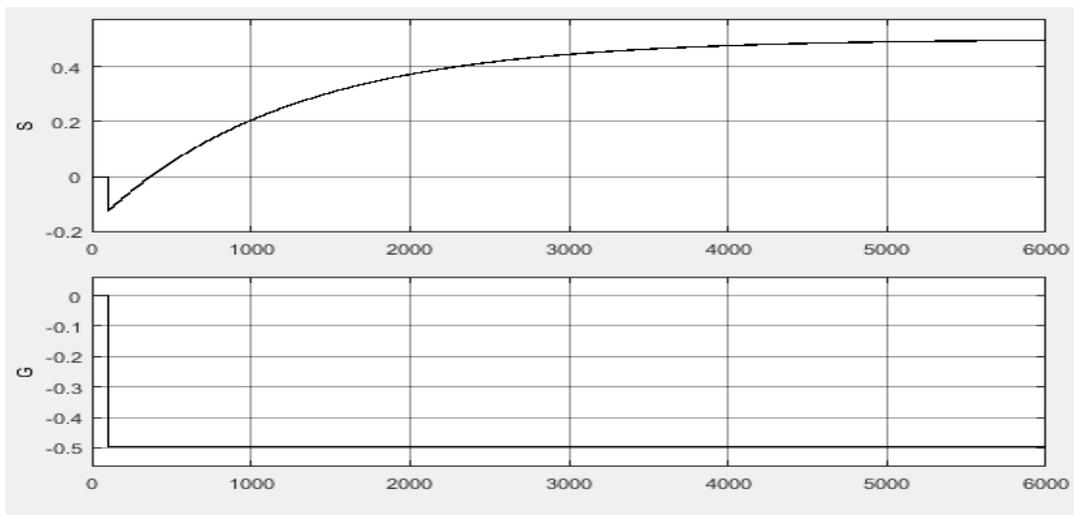


Рисунок 4 – Графики переходных процессов на участке неминимально-фазового типа (рис.1) при форсированном уменьшении расхода воздуха

В силу этого синтез системы управления проветриванием участков неминимально-фазового типа (1) сводится, прежде всего, к компенсации опасных всплесков концентрации метана при изменении режима проветривания участка и эффективной стабилизации желаемого уровня концентрации метана в стационарном режиме при изменении газодинамических параметров участка.

### **Синтез и моделирование системы управления проветриванием участков неминимально-фазового типа**

Для реализации желаемых режимов управления проветриванием участков используем закон управления [4]:

$$G = -\frac{1}{T_{вp}}(S_z - S), \quad (2)$$

где  $T_{вp}$  – постоянная времени регулятора расхода воздуха;  $S_z$  – заданное значение концентрации метана в исходящей струе участка.

Тогда, согласно (1)-(2), переходные процессы в системе управления участком будут описываться соотношением:

$$S = G \frac{\tau p - 1}{T p + 1};$$

$$S = -\frac{1}{T_{вp}}(S_z - S) \frac{\tau p - 1}{T p + 1} = \frac{1 - \tau p}{T_{вp}(T p + 1)}(S_z - S), \quad (3)$$

где  $\frac{\tau p - 1}{T p + 1}$  – передаточная функция участка (1).

После очевидных преобразований (3) получим:

$$T_{в} T \ddot{S} + (T_{в} - \tau) \dot{S} + S = S_z - \tau \dot{S}_z. \quad (4)$$

Для обеспечения абсолютной устойчивости системы (4) примем:

$$T_{в} \gg \tau. \quad (5)$$

Тогда переходные процессы в системе управления, согласно (4)-(5), будут описываться уравнением:

$$T_{в} T \ddot{S} + T_{в} \dot{S} + S = S_z - \tau \dot{S}_z. \quad (6)$$

Для определения динамических свойств системы (6) исследуем переходные процессы в системе (6) при типовой форме изменения задающего воздействия  $S_z$  – скачкообразного изменения его уровня.

Переходя при этом к конечным значениям переменных, представим (6) в виде:

$$\frac{d\alpha}{dt} = S_z - S, \quad (7)$$

$$\text{где } \alpha = T_{в} T \dot{S} + T_{в} S + \tau S_z.$$

В общем случае, согласно (7), имеем:

$$\alpha = \int_0^t (S_z - S) dt, \quad (8)$$

где  $t=0$  – начало переходного процесса, обусловленное скачкообразным изменением задающего воздействия.

При произвольной форме изменения переменных  $S_z$  и  $S$ , согласно (8), справедливо соотношение:

$$\alpha(t=0) = \int_0^0 (S_z - S) dt = 0. \quad (9)$$

В силу этого, согласно (9) и (7), имеем:

$$T_{в} T \dot{S}(0) + T_{в} S(0) + \tau S_z = 0. \quad (11)$$

Таким образом, если до изменения задающего воздействия в исходном состоянии концентрация метана на выходе участка, составляла:

$$S(0)=0, \quad (11)$$

то, согласно (10), в системе (6) значение будет:

$$\dot{S}(0) = -\gamma \cdot S_z, \quad (12)$$

где  $\gamma = \tau / (T_{в} T)$ .

Таким образом, после скачкообразного изменения задающего воздействия  $S_z(t>0)=\text{const}$  и  $\dot{S}_z(t > 0) = 0$ , согласно (7) и (11)-(12), переходной процесс в системе управления описывается дифференциальным уравнением:

$$T_{в} T \ddot{S} + T_{в} \dot{S} + S = S_z, \quad (13)$$

где  $S(0)=0$ ,  $\dot{S}(0) = -\gamma \cdot S_z$ ,  $S_z=\text{const}$ .

Корни характеристического уравнения  $T_{в} T \ddot{S} + T_{в} \dot{S} + S = 0$  системы (13) имеют вид:

$$r_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{e}}{2T}, \quad (14)$$

где  $e=1-(4T/T_{в})$ .

Для обеспечения экспоненциального характера переходного процесса в системе управления (13) примем в (14):

$$T_{в} > 4T. \quad (15)$$

Тогда решение однородного уравнения в итоге будет иметь вид:

$$S_{\text{одн}} = A \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + B \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right), \quad (16)$$

где  $T_1 = 2Tm_1$ ;  $T_2 = 2Tm_2$ ;

$$m_1 = \frac{1}{1-\sqrt{e}}; m_2 = \frac{1}{1+\sqrt{e}},$$

A, B – постоянные интегрирования,

$S_{\text{одн}}$  – решение однородного уравнения системы (13).

Таким образом, общее решение уравнения (13) при  $S_z(t>0)=\text{const}$ , согласно (13) и (16), будет иметь вид:

$$S(t > 0) = A \cdot \exp(-t/T_1) + B \cdot \exp(-t/T_2) + S_z; \quad (17)$$

$$\dot{S}(t > 0) = (-A/T_1) \cdot \exp(-t/T_1) - (B/T_2) \cdot \exp(-t/T_2), \quad (18)$$

где  $S(t=0)=0=A+B$ ;  $S_z(-A/T_1)-(B/T_2)=-\gamma S_z$ .

В силу этого получим:

$$B = [T_2/(T_1 - T_2)](1 + \gamma T_1)S_z, \quad (19)$$

$$A = -[T_1/(T_1 - T_2)](1 + \gamma T_2)S_z. \quad (20)$$

В итоге, согласно (5), (12), (16) и (19-20), имеем:

$$B = [m_2/(m_1 - m_2)](1 + 0.1m_2)S_z, \\ A = [-m_1/(m_1 - m_2)](1 + 0.1m_1)S_z, \quad (21)$$

где  $m_1/(m_1 - m_2) = T_1/(T_1 - T_2)$ ,

$$m_2/(m_1 - m_2) = T_2/(T_1 - T_2),$$

$$T_B = 20\tau,$$

$$\gamma = \tau / (T_B T) = \tau / (20\tau T) = 1 / (20T),$$

$$T_2 \gamma = 2Tm_2 / (1 / (20T)) = 0.1m_2,$$

$$T_1 \gamma = 2Tm_1 / (1 / (20T)) = 0.1m_1.$$

При номинальных параметрах участка и выбранных настройках регулятора расхода воздуха, согласно (14), (16) и (21), получим:

$$B = [m_2/(m_1 - m_2)](1 + 0.1m_1)S_z = 0.73S_z, \quad (22)$$

$$A = [-m_1/(m_1 - m_2)](1 + 0.1m_2)S_z = -1.73S_z,$$

где  $e = 1 - (4T/T_B) = 1 - (4T/5T) = 0.2$ ;

$$\sqrt{e} = \sqrt{0.2} = 0.447; m_1 = 1.81; m_2 = 0.691;$$

$$T_B = 5T.$$

Скорость изменения концентрации метана, согласно (18) и (19-21), описывается соотношением:

$$\dot{S}(t) = 1/(T_1 - T_2) \cdot [(1 + 0.1m_2)\exp(-t/T_1) - (1 + 0.1m_1) \cdot \exp(-t/T_2)]S_z. \quad (23)$$

Откуда следует:

$$t_3 = \ln\left(\frac{1+0.1m_1}{1+0.1m_2}\right) \cdot \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}.$$

При номинальных параметрах участка и выбранных параметрах настройки системы управления, согласно (16) и (21), получим:

$$t_3 = 0.228T. \quad (24)$$

Таким образом, экстремальное значение концентрации метана в переходном процессе, согласно (16) и (22-24), имеет значение:

$$S_3(t = t_3) = \left(-1.73 \cdot \exp\left(-\frac{t_3}{T_1}\right) + 0.73 \cdot \exp\left(-\frac{t_3}{T_2}\right) + 1\right)S_z = -0.005S_z. \quad (25)$$

где  $\exp\left(-\frac{t_3}{T_1}\right) = \exp\left(-\frac{0.228T}{2Tm_1}\right) = 0.94$ ,  
 $\exp\left(-\frac{t_3}{T_2}\right) = \exp\left(-\frac{0.228T}{2Tm_2}\right) = 0.851$ .

Таким образом, согласно (25), экстремальное значение концентрации метана  $S_3(t = t_3)$  инверсно относительно конечного уровня концентрации метана  $S = S_z$  и представляет уровень всплеска концентрации метана относительно исходного уровня  $S(t=0)=0$  при регулировании режима проветривания участка.

Однако, поскольку пиковое значение всплеска  $S_3(t = t_3)$ , согласно (25), составляет не более 0.5% от формируемого значения концентрации метана  $S_z$  в системе практически обеспечивается безопасное по газу управление проветриванием участка неминимально-фазового типа.

Аналоговая модель исследованной эквивалентной функциональной схемы управления (7) показана на рис.5.

Временные графики модели (рис.6) хорошо коррелируют с результатами проведенных аналитических исследований, что подтверждает корректность проведенных преобразований и принятых рекомендаций по настройке системы управления

Аналоговая модель структурной схемы системы управления проветриванием участков неминимально-фазового типа (1)-(2) показана на рис. 7.

Экспериментальные графики управления участком неминимально-фазового типа (рис.8) адекватны соответствующим динамическим характеристикам эквивалентной функциональной схемы системы управления (рис.6), что подтверждает обоснованность и корректность рекомендаций по выбору алгоритма и настройке регулятора расхода воздуха.

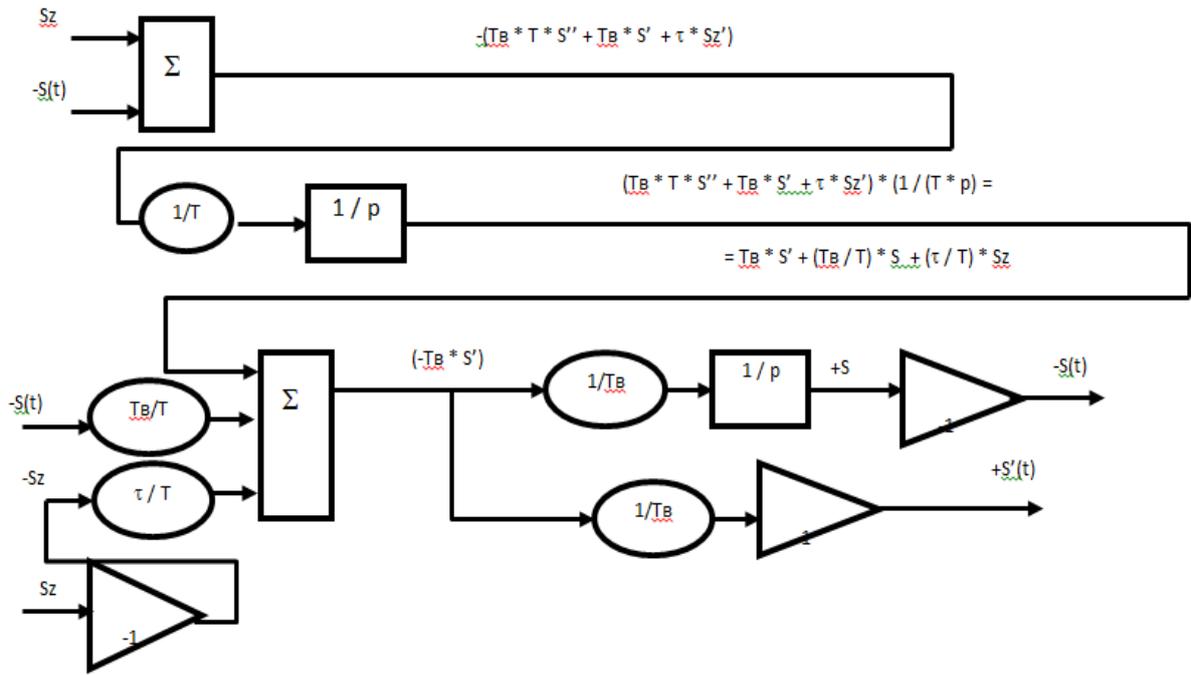


Рисунок 5 – Аналоговая модель эквивалентной функциональной схемы системы управления проветриванием участков неминимально-фазового типа

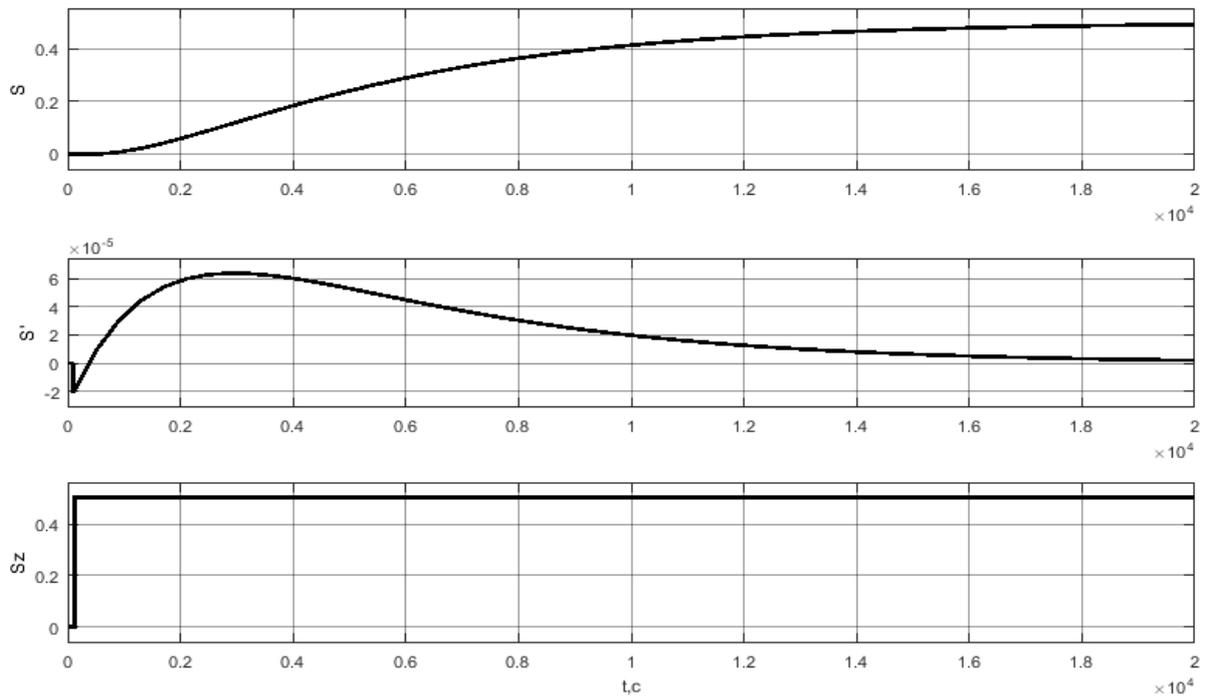


Рисунок 6 - Экспериментальные графики эквивалентной функциональной схемы управления проветриванием участков неминимально-фазового типа

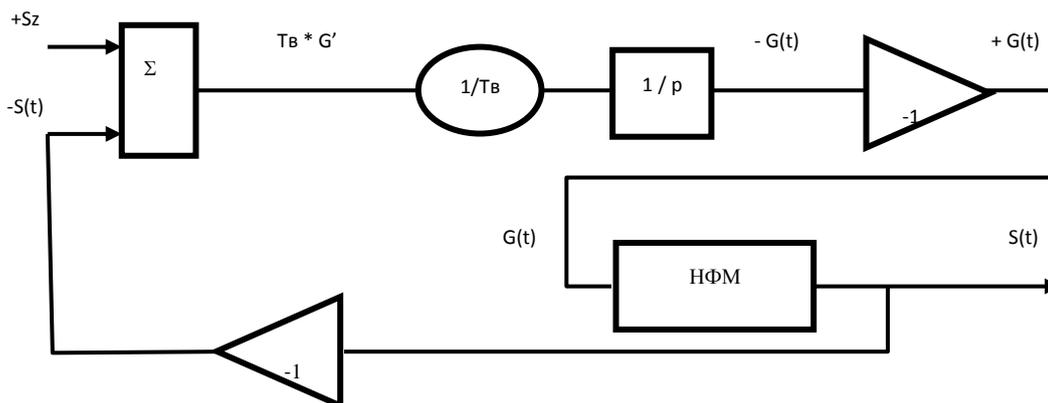


Рисунок 7 – Аналоговая модель структурной схемы управления проветриванием участков минимально-фазового типа

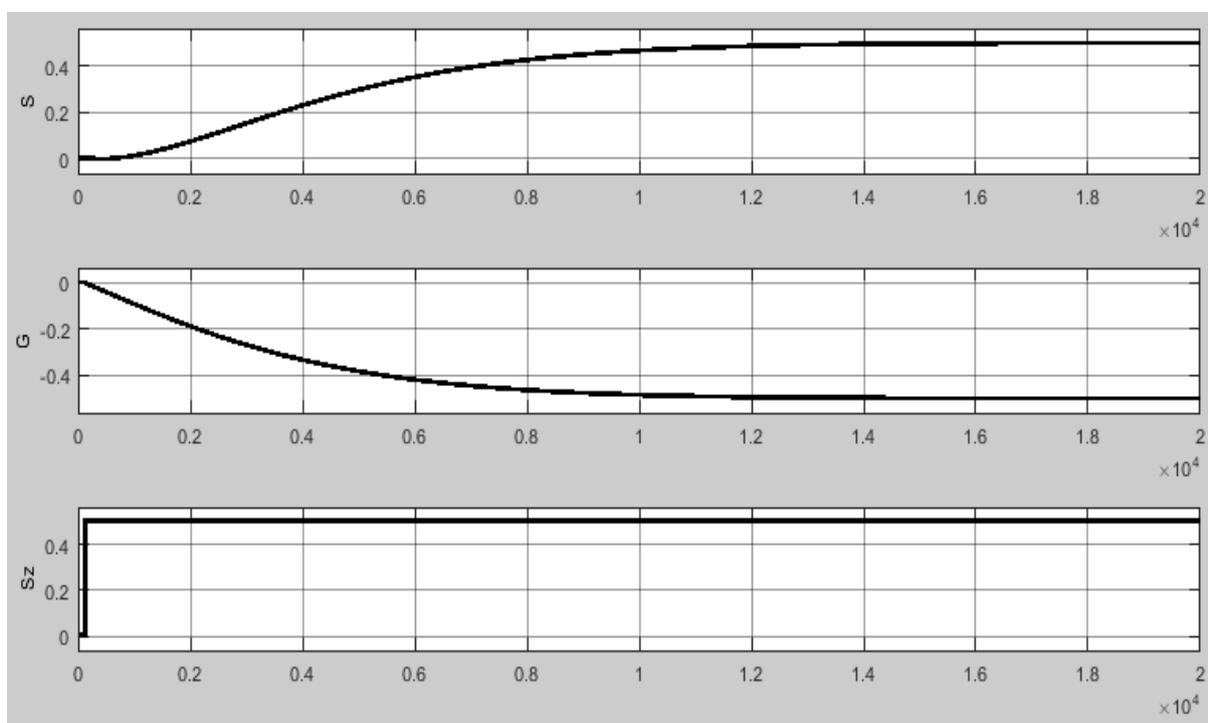


Рисунок 8 – Экспериментальные графики структурной схемы управления проветриванием участков неминимально-фазового типа

### Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

- в качестве регулятора расхода воздуха в системе управления проветриванием выемочных участков предложено использовать инерционное звено первого порядка;

- в общем виде получено аналитическое описание переходных процессов в системе управления проветриванием участков, обладающих неминимально-фазовыми динамическими свойствами, т.е. наиболее сложных в управлении;

- определена постоянная времени регулятора расхода воздуха системы управления проветриванием участков, при которой

обеспечивается устойчивость системы и безопасный по газу характер переходных процессов управления;

- требуемое качество и работоспособность синтезированных систем управления проветриванием участков, корректность и работоспособность разработанных алгоритмов управления обоснованы и подтверждены аналоговым моделированием типовых режимов работы синтезированных систем управления;

- разработанный способ управления участками неминимально-фазового типа является перспективным для управления неминимально-фазовыми объектами другой физической природы.

## Литература

1. Круглов, Ю. В. Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников / Ю. В. Круглов, Л. Ю. Левин, А. В. Зайцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2011. - №5.

2. Ушаков, В. К. Математическое моделирование надежности и эффективности шахтных вентиляционных систем / В. К. Ушаков : учебное пособие. - М.: изд-во МГГУ, 2003. – 182 с.

3. Фельдман, Л. П. Уравнения неустановившегося движения метано-воздушной смеси в выработках и выработанном пространстве участка. / Л. П. Фельдман. – В кн.: Разработка месторождений полезных ископаемых. – Киев: Техника, 1971. - Вып.22. – С.95-105.

4. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Санкт-Петербург: Профессия, 2003. – 752 с.

5. Чередникова, О. Ю. Исследование переходных процессов в системе управления проветриванием угольных шахт в выемочных участках минимально-фазового типа / О. Ю. Чередникова, Ю. С. Достлев // Информатика и кибернетика. – Донецк: ДонНТУ, 2021. - № 1-2 (23-24). – С. 108-114.

6. Чередникова, О. Ю. Синтез и исследование методами математического моделирования систем управления проветриванием выемочных участков угольных шахт / О. Ю. Чередникова, Ю. С. Достлев // Информатика и кибернетика. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – № 1(15). - С. 65-74.

**О.Ю. Чередникова, Ю.С. Достлев. Исследование переходных процессов в системе управления проветриванием угольных шахт в выемочных участках неминимально-фазового типа.** В системе управления воздухораспределением для установления желаемого режима проветривания на выемочных участках неминимально-фазового типа предложено использовать регулятор расхода воздуха в виде инерционного звена первого порядка. Аналитически определены оптимальные настройки регулятора расхода воздуха, при которых обеспечиваются устойчивость системы управления проветриванием участков неминимально-фазового типа, желаемая точность работы системы управления, безопасный характер переходных процессов при регулировании и стабилизации режимов проветривания участков. Достоверность проведенных аналитических исследований и работоспособность предложенных систем управления проветриванием участков подтверждены математическим моделированием.

**Ключевые слова:** неминимально-фазовый объект, моделирование, система управления, концентрация метана

**Cherednikova O. Yu., Dostlev Yu. S. Investigation of transient processes in the control system of ventilation of coal mines in mining areas of the non-minimum-phase type.** In the air distribution control system, to establish the desired ventilation mode in the excavation areas of the non-minimum-phase type, it is proposed to use an air flow controller in the form of a first-order inertial link. The optimal settings of the air flow controller are analytically determined, which ensure the stability of the control system for ventilation of non-minimum-phase areas, the desired accuracy of the control system, the safe nature of transients when regulating and stabilizing the modes of ventilation of areas. The reliability of the conducted analytical studies and the operability of the proposed control systems for the ventilation of areas are substantiated by mathematical modeling.

**Key words:** non-minimum-phase object, modeling, control system, methane concentration.

Статья поступила в редакцию 25.02.2022  
Рекомендована к публикации профессором Аноприенко А.Я.