

УДК 551.46.08

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ПРИРОДА-ТЕХНОГЕНИКА»

Р. И. Сольницев,
доктор техн. наук, профессор

Г. И. Коршунов,
доктор техн. наук, профессор

А. А. Шабалов,
ассистент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассмотрены вопросы создания замкнутой системы управления «Природа-техногеника», пред назначенной для эффективного снижения загрязняющих веществ, выбрасываемых промышленными предприятиями в атмосферу. Представлена математическая модель замкнутой системы управления и модели составляющих ее звеньев. Приведены результаты анализа системы на основе моделирования.

Концепция «Природа-техногеника», предложенная и развитая в работах [1–6], предусматривает создание замкнутой системы управления «Природа-техногеника» (ЗСУПТ) для широкого класса объектов, где требуется минимизация концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) техногенного характера.

Отличительные особенности концепции представлены тремя критериями:

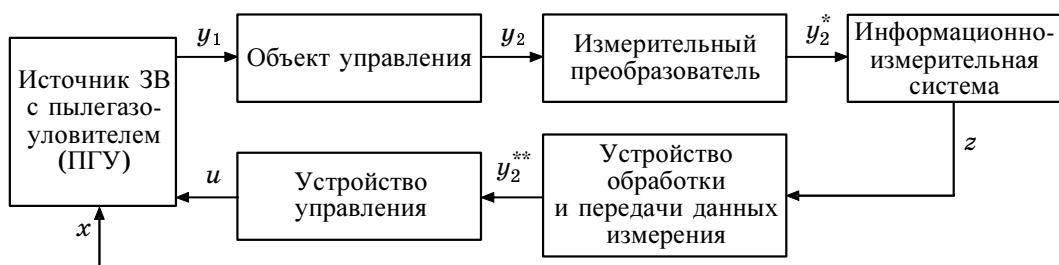
- минимизация или полное исключение «человеческого фактора»;
- управление концентрациями ЗВ на основе определения их максимальных значений;
- сохранение технологии основного производства в условиях минимизации концентраций ЗВ.

В работе рассмотрена задача моделирования ЗСУПТ «Природа-техногеника», решение которой необходимо для создания таких систем в различных областях человеческой деятельности.

Объектом управления ЗСУПТ является масса (концентрация) ЗВ в газовоздушной смеси, перемещающаяся от устья «трубы» промышленного предприятия до точки, где расположен измерительный преобразователь. В работе рассматривается ЗСУПТ на примере только одной составляющей ЗВ — диоксида серы SO_2 .

Ущерб, наносимый окружающей среде диоксидом серы, его характеристики и составляющие хорошо известны. Дополнительно можно отметить, что при производительности котла ТЭЦ 100 т пара/ч выброс SO_2 составит 2–3 т/сут, и выпадение серы будет иметь место в круге с радиусом до 100 км от i -го источника, что крайне отрицательно оказывается на здоровье людей, растениях, зданиях и других составляющих окружающей среды этой ТЭЦ.

Задачей математического моделирования является воспроизведение на ЭВМ динамики и процессов функционирования ЗСУПТ (рис. 1) и дальнейший



■ Рис. 1. Схема замкнутой системы управления «Природа-техногеника»

анализ на основе моделирования. Для решения этой задачи необходимо составить математические модели всей системы и ее отдельных звеньев.

Для качественной оценки динамики ЗСУПТ рассмотрим уравнение материального баланса, выражающее неразрывность изменения массы или концентрации ЗВ:

$$\frac{dy}{dt} = K_1 x - K_2 y - K_3 y, \quad (1)$$

где x — среднее значение количества сжигаемого в ТЭЦ топлива при производстве основного продукта — пара; y — среднее значение количества массы ЗВ, выбрасываемого ТЭЦ в атмосферу; K_1 — коэффициент пропорциональности, определяющий содержание в топливе ЗВ (в частности, содержание серы в сланцах составляет 3,5 %, мазуте — 2,5 %, угле — от 0,5 до 4 %); K_2 — коэффициент, зависящий от синоптических, температурных, химических и других внешних параметров и определяющий поглощение SO_2 внешней средой; K_3 — коэффициент, выражающий величину позиционной обратной связи системы управления в ЗСУПТ. Уравнение (1) имеет аналитическое решение

$$y = \left(y_0 - \frac{K_1}{K_2 + K_3} x \right) e^{-(K_2 + K_3)t} + \frac{K_1}{K_2 + K_3} x, \quad (2)$$

где y_0 — масса ЗВ в момент времени $t_0 = 0$.

Из этого следует очевидный результат: выбо-ром регулируемого коэффициента K_3 можно принципиально снизить массу (концентрацию) ЗВ до предельно допустимой величины [5].

В случае заданных как функции времени $x(t)$ и $K_2(t)$ уравнение (1) примет вид

$$\frac{dy}{dt} + [K_2(t) + K_3]y = K_1x(t). \quad (3)$$

Решение этого уравнения также находится аналитически двумя квадратурами:

$$y = y_0 e^{-\int_0^T [K_2(t) + K_3] dt} + e^{-\int_0^T [K_2(t) + K_3] dt} \int_0^T K_1 x(t) e^{\int_0^t [K_2(s) + K_3] ds} dt, \quad (4)$$

где T — время наблюдения.

Выражение (4) позволяет контролировать результаты моделирования и получать качественные оценки ЗСУПТ. Дальнейшее уточнение предложенной модели достигается содержательным представлением коэффициентов K_1 и K_2 , которые определяются через связи выброса с расходом топлива (K_1) и синоптическими, диффузионными, химическими и конвекционными процессами (K_2). Приближенное значение K_2 можно определить двумя аддитивными составляющими:

$$K_2 = K_{2\Phi} + K_{2\Sigma};$$

$$K_{2\Phi} = 0,6 \dots 0,9;$$

$$K_{2\Sigma} = \frac{t_B}{\pi \sigma_y \sigma_z v} e^{-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}},$$

где $K_{2\Phi}$ — составляющая от фильтрации ПГУ; t_B — время выброса; H — высота выброса (высота трубы и высота факела выброса); v — скорость ветра; σ_y, σ_z — среднеквадратические отклонения факела от его оси.

Переменные $x(t)$ и $K_2(t)$ обычно известны по результатам мониторинга.

Для оценки характеристик ЗСУПТ по устойчивости, качеству, динамике процессов регулирования предлагается математическая модель ЗСУПТ на основе моделей отдельных звеньев, представляющих собой передаточные функции звеньев ЗСУПТ, показанной на рис. 1.

Структурная схема ЗСУПТ согласно рис. 1 изображена на рис. 2.

Приведем математические модели звеньев ЗСУПТ в виде передаточных функций отдельных звеньев.

Передаточная функция переноса ЗВ с выхода топливных газов до устья трубы (W_1) представлена выражением

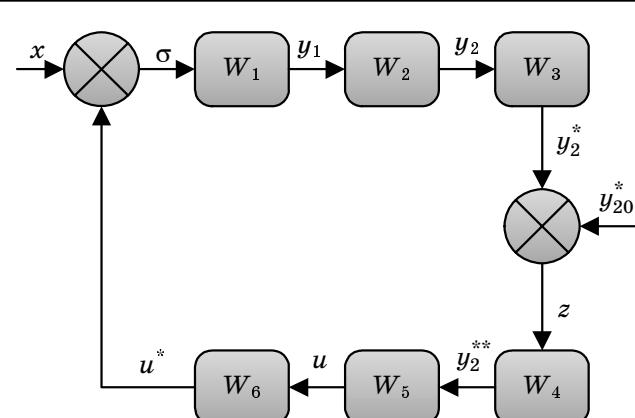
$$y_1(t) = W_1(p)\sigma(t), \quad W_1 = \frac{K_1}{1 + T_1 p}, \quad (5)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ при нулевых начальных условиях;

$$\sigma(t) = x(t) - u^*(t), \quad (6)$$

где x — возмущающее воздействие; u^* — управляющее воздействие.

Передаточная функция преобразования массы ЗВ в составе факела при переносе от устья трубы до точки измерения (W_2) в простейшем случае может быть представлена выражением



■ Рис. 2. Структурная схема ЗСУПТ

$$y_2(t) = W_2(p)y_1(t), \quad W_2 = \frac{K_4}{1+T_2 p} e^{-p\tau_1}, \quad (7)$$

где K_4 — коэффициент пропорциональности, зависящий от превращений параметров атмосферы, таких как давление, влажность, начальная концентрация ЗВ, температура окружающей среды, коэффициенты диффузии и поглощения ЗВ подстилающей поверхностью; T_2 — постоянная времени инерционных процессов переноса ЗВ; τ_1 — время чистого запаздывания при переносе количества вещества от устья трубы до точки измерения ЗВ датчиком. В общем случае величина τ_1 определяется в результате решения уравнения турбулентной диффузии при заданных краевых и начальных условиях. В простейшем случае при расчете τ_1 значениями горизонтальных коэффициентов диффузии можно пренебречь, а движение воздушных потоков считать однородными в рассматриваемой области пространства. В этом случае τ_1 рассчитывается по формуле

$$\tau_1 = S/v, \quad (8)$$

где S — расстояние от устья трубы до точки измерения максимума концентрации ЗВ датчиком; v — средняя скорость ветра на высоте факела (H).

Передаточная функция измерительного преобразования (W_3) представлена выражением

$$y_2^* = W_3(p)y_2, \quad W_3 = \frac{K_5}{1+T_3 p} e^{-p\tau_2}, \quad (9)$$

где τ_2 — время измерительного преобразования, зависящее от принципа действия и конструкции используемого измерительного устройства. Для предполагаемых к использованию полупроводниковых сенсоров время реакции газочувствительной характеристики не превышает 5 с и время восстановления также не более 5 с. Измерительный преобразователь располагается в точке максимума концентрации ЗВ и выполняет полный цикл измерения за время, определяемое параметрами сенсора.

Передаточная функция процесса формирования, накопления, обработки, преобразования и передачи данных измерения (W_4) представлена выражением

$$y_2^{**}(t) = W_4(p)z(t), \quad W_4 = \frac{K_6}{1+T_4 p} e^{-p\tau_3}, \quad (10)$$

где τ_3 — суммарное время, затрачиваемое на процессы формирования, накопления, обработки, преобразования и передачи данных измерения ЗВ; z — ошибка, вычисляемая по формуле

$$z = y_2^* - y_{20}^*, \quad (11)$$

где y_{20}^* — допустимая величина концентрации, в частности ЗВ, на расстоянии S от устья трубы

при определенных погодных условиях и параметрах функционирования предприятия (ТЭЦ), которая всегда меньше ПДК.

Параметры передаточной функции W_4 определяются быстродействием аналого-цифрового преобразования и накопления в памяти информационно-вычислительного устройства, а также временным запаздыванием, зависящим от скорости передачи, времени обработки и накопления данных, которое может составлять единицы или десятки секунд. Выбор стандартных протоколов GSM и GPS обеспечивает стабильность передачи данных, однако возможно использование специальных протоколов.

Управляющее воздействие на агрегат очистки от загрязняющих веществ (W_5) представлено выражением

$$u = (K_7 + K_8 p + K_9/p)y_2^{**}. \quad (12)$$

Значения коэффициентов передачи по пропорциональной составляющей, по первой производной и изодромной составляющей выбираются из условий устойчивости и качества регулирования концентрации ЗВ. Синтез управлений в ЗСУПТ приведен в работах [3, 5]. Здесь использован ПИД-регулятор. Применение других управлений — инвариантных, импульсных, экстремальных — предусмотрено при дальнейшей разработке ЗСУПТ.

Передаточная функция очистного агрегата (W_6), включающего усилиительно-преобразующее устройство, представлена выражением

$$u^*(t) = W_6(p)u(t), \quad W_6(p) = \frac{K_{10}}{1+T_5 p}, \quad (13)$$

где K_{10} , T_5 зависят от типа и конструкции управляющих ПГУ.

Время реакции для различных типов ПГУ (рукавных, электрофильтров, импульсных, каталитических) составляет от единиц до десятков секунд.

На основе математических моделей (5)–(13) строится полная математическая модель (передаточная функция) ЗСУПТ, оценивается ее устойчивость, динамические и статические ошибки при вариации K_i , T_j , τ_s , $i = 1 \dots 10$, $j = 1 \dots 3$, $s = 1 \dots 3$.

Передаточная функция ЗСУПТ по ошибке регулирования z/y_{20} имеет вид

$$\frac{z}{y_{20}} = \frac{p(1+T_1 p)(1+T_2 p)(1+T_3 p)(1+T_4 p)(1+T_5 p)}{p(1+T_1 p)(1+T_2 p)(1+T_3 p)(1+T_4 p)(1+T_5 p)+a}, \quad (14)$$

где $a = K_1 K_4 K_5 K_6 K_{10} (K_9 + K_7 p + K_8 p^2) e^{-p(\tau_1+\tau_2+\tau_3)}$.

Передаточная функция по отношению к возмущению x :

$$\frac{z}{x} = \frac{K_1 K_4 K_5 e^{-p(\tau_1+\tau_2)} p(1+T_4 p)(1+T_5 p)}{p(1+T_1 p)(1+T_2 p)(1+T_3 p)(1+T_4 p)(1+T_5 p)+a}. \quad (15)$$

Наименование	X	K_1	T_1	τ_1	K_4	T_2	τ_2	K_5	T_3	τ_3	K_6	T_4	y^*_{20}	K_7	K_8	K_9	K_{10}	T_5
Размерность	т	—	с	с	—	с	с	—	с	с	—	с	т	—	—	—	—	с
Значение	1000	0,01	1,6	60	1	10	6	1	1	0	1	1	1	2	0	0,35	1	10

Из (14) и (15) следует, что ЗСУПТ является астатической по отношению к ошибке регулирования y^*_{20} и по отношению к возмущению x .

В таблице приведены номинальные значения параметров, полученные из различных источников [1–6]. На рис. 3 показано изменение ошибки z при ступенчатом входном воздействии функции X для разомкнутой (кривая 1) и замкнутой (кривая 2) систем.

На основе данных таблицы можно показать, что процессы измерения выполняются в режиме реального времени и параметры интегратора обеспечивают устойчивое регулирование при периодическом получении данных измерения по каналу связи. В дальнейшем осуществлялось моделирование поведения системы, заданной передаточной функцией, при изменении значений отдельных параметров. По результатам моделирования определены параметры управления, обеспечивающие устойчивость, требуемые величины затухания, динамической и статической ошибок.

Рисунки демонстрируют изменение процесса регулирования от изменения:

- величины чистого запаздывания при переносе количества вещества от устья трубы до точки измерения ЗВ датчиком (рис. 4, а);
- вида топлива (рис. 4, б);

- параметров интегратора (рис. 4, в);
- выбранных комбинаций величины чистого запаздывания и параметров интегратора (рис. 4, г);
- коэффициента усиления регулятора (рис. 4, д).

Анализ зависимостей позволяет ввести допуски на значения параметров. Результаты моделирования показывают возможность создания эффективной системы управления, способной обеспечивать достаточное качество управления концентрацией ЗВ в газовоздушной смеси.

В дальнейшем учет диффузионных и конвекционных процессов в ЗСУПТ осуществляется на основе уравнения классической турбулентной диффузии:

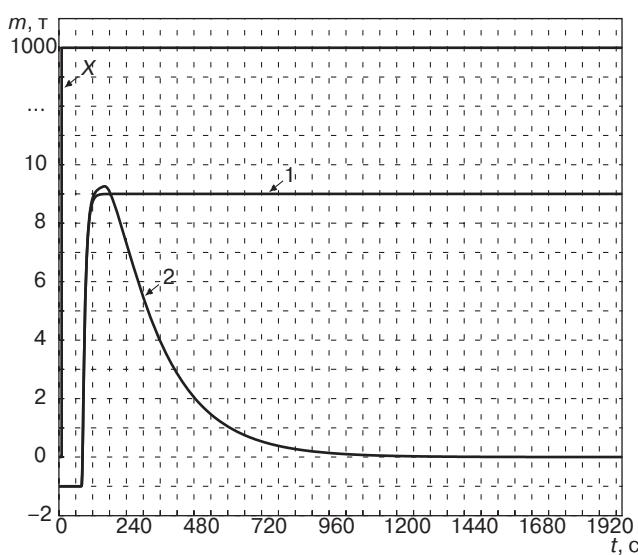
$$\begin{aligned} \frac{\partial y_\theta}{\partial t} + v_\zeta \frac{\partial y_\theta}{\partial \zeta} + v_\eta \frac{\partial y_\theta}{\partial \eta} + v_\xi \frac{\partial y_\theta}{\partial \xi} = \\ = \frac{\partial}{\partial \zeta} k_\zeta \frac{\partial y_\theta}{\partial \zeta} + \frac{\partial}{\partial \eta} k_\eta \frac{\partial y_\theta}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \xi} k_\xi \frac{\partial y_\theta}{\partial \xi} - ay, \quad (16) \end{aligned}$$

где y_θ — концентрация ЗВ; k_ζ , k_η , k_ξ — горизонтальные и вертикальная составляющие коэффициента турбулентного обмена; v_ζ , v_η , v_ξ — горизонтальные и вертикальная составляющие скорости перемещения ЗВ; a — коэффициент, определяющий изменение концентрации за счет процессов химического превращения примеси, а также ее осаждения (пропорционален K_2). Дополняя это уравнение возмущающим воздействием x , получим

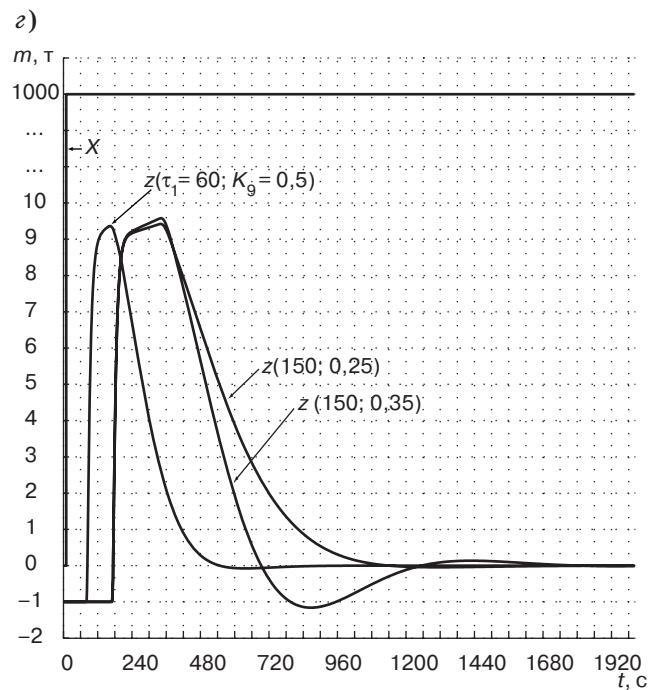
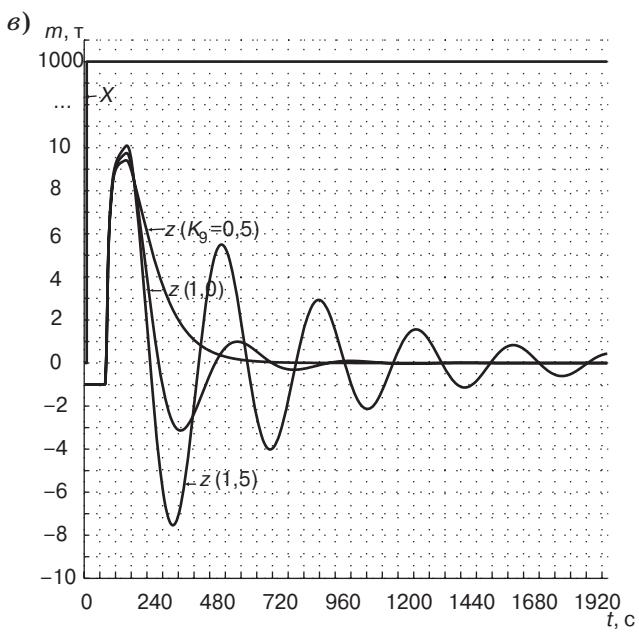
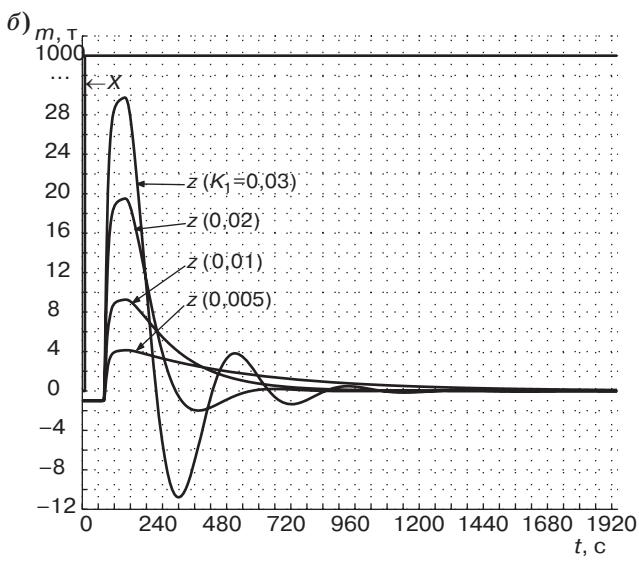
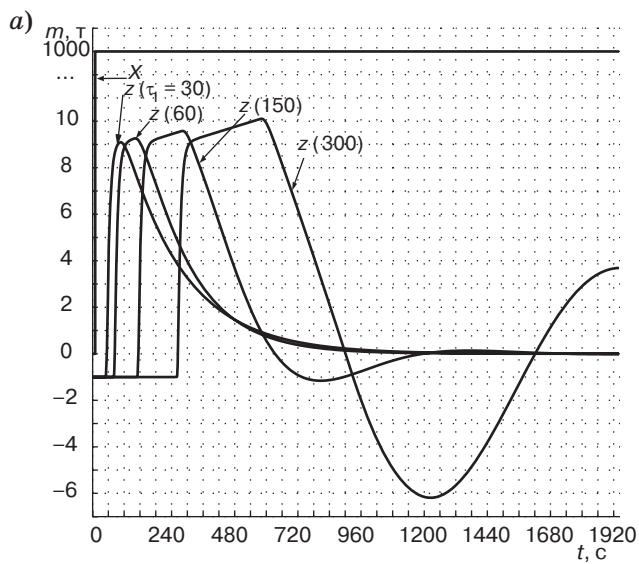
$$\begin{aligned} \frac{\partial y_\theta}{\partial t} + v_\zeta \frac{\partial y_\theta}{\partial \zeta} + v_\eta \frac{\partial y_\theta}{\partial \eta} + v_\xi \frac{\partial y_\theta}{\partial \xi} = \\ = \frac{\partial}{\partial \zeta} k_\zeta \frac{\partial y_\theta}{\partial \zeta} + \frac{\partial}{\partial \eta} k_\eta \frac{\partial y_\theta}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \xi} k_\xi \frac{\partial y_\theta}{\partial \xi} - K_1^* x - K_2^* y. \quad (17) \end{aligned}$$

Переход от модели (17) к модели вход-выход на основе функции Грина предложен в работе [3].

Предложенная в статье структура, математические модели и параметры ЗСУПТ и ее звеньев позволяют получить в результате моделирования качественные оценки устойчивости, регулирования, часть из которых приведена в работе. Также приведена оценка толерантности ЗСУПТ при изменении ее коэффициентов и параметров. Авторы использовали упрощенную модель преобразования массы ЗВ в составе факела в виде звена чистого запаздывания при принятых допущениях, один датчик, устанавливаемый в точке максимума концентрации ЗВ, и ПИД-регулятор. Это позволило по-



■ Рис. 3. Изменение ошибки z при ступенчатом изменении воздействия функции X , с замкнутой и разомкнутой обратной связью



■ Рис. 4. Изменение ошибки z при ступенчатом изменении воздействия функции X : *a* – при различных значениях τ_1 ; *б* – при различных значениях K_1 ; *в* – при различных значениях K_9 ; *г* – при различных значениях K_9 и τ_1 ; *д* – при различных значениях K_7

лучить качественные характеристики процесса регулирования и перейти к экспериментам, уточнению значений параметров, а при необходимости — функций звеньев. Для реализации конкретных проектов ЗСУПТ необходима дальнейшая детализация математических моделей и моделирование с целью выбора и обоснования технических

решений, в том числе выбора значений допусков параметров, обеспечения расположения измерителя в точке максимума концентрации, уточнения типа и параметров канала связи. Полученные результаты подтверждают концепцию построения ЗСУПТ для минимизации ЗВ и дают основания для опытно-конструкторской разработки этой системы.

Литература

1. Solnitsev R. I. The instrumentation in ecology and human safety // IEHS'96. ISA — SPb. Russian sect. / SPb. SUAI, 1996. P. 16–18.
2. Solnitsev R. I. The simulation of "Nature-technogenic" system // IEHS'98. ISA — SPb. Russian sect. / SPb. SUAI, 1998. P. 8–10.
3. Solnitsev R. I. Creation of "Nature-technogenic" control systems on the base of information technologies // IEHS'02. ISA — SPb. Russian sect. / SPb. SUAI, 2002. P. 12–17.

4. Solnitsev R. I. Human factor minimization in the "Nature-technogenic" system // IEHS'04. ISA — SPb. Russian sect. / SPb. SUAI, 2004. P. 15–17.
5. Сольницев Р. И. Построение замкнутых систем «Природа-техногеника»: Тр. XXXIII МНТК МАДИ+С&Е'06, Украина, Крым, Ялта—Гурзуф, 20–30 мая 2006 г. // Открытое образование. С. 404–408.
6. Solnitsev R. I., Korshunov G. I., Klotchkov I. B. The "Nature-technogenic" closed system — innovative project // IEHS'07. ISA — SPb. Russian sect. / SPb. SUAI, 2007. P. 15–20.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.