

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА И ГИБРИДНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

И.И. БОСИКОВ^{1,2}

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)
362021, Россия, Владикавказ, ул. Николаева, 44

²Астраханский государственный технический университет
414056, Россия, Астрахань, ул. Татищева, 16

Аннотация. В статье описан метод анализа и гибридного имитационного моделирования сложных технических систем переменной структуры (СТС ПС), включающий в себя: сбор и обобщение информации о СТС ПС; выделение кластеров и элементов СТС ПС и выявление их значимых показателей; создание логической модели СТС ПС; обоснование и выбор математических моделей для построения имитационной гибридной модели СТС ПС; построение математических моделей различных типов для описания всех компонентов СТС ПС и оценку достоверности моделирования кластеров и элементов СТС ПС с использованием построенных математических моделей; формирование структуры имитационной гибридной модели СТС ПС на основе объединения построенных математических моделей и структурно-параметрическую настройку взаимосвязей между математическими моделями в имитационной гибридной модели СТС ПС; мониторинг состояния кластеров и элементов СТС ПС, структурно-параметрическую настройку и изменение типов математических моделей.

Целью работы является разработка метода анализа и гибридного имитационного моделирования СТС ПС.

Новизна заключается в том, что предложенный метод ориентирован на особенности СТС ПС рассматриваемого класса в условиях неполноты информации, разнокачественных данных о состоянии и функционировании СТС ПС, отличается от известных сочетанием возможностей аналитического, аналитическо-статистического и имитационного подходов к построению имитационных гибридных моделей СТС ПС, позволяет осуществлять адаптацию к изменениям системных и внешних факторов, повысить точность моделирования, а также типизировать представление характерных ситуационных признаков для эффективного управления СТС.

Ключевые слова: сложная техническая система переменной структуры, имитационная гибридная модель, системные и внешние факторы, кластеры, математические модели, ситуационные признаки, вентиляционная система угольных шахт

Статья поступила в редакцию 25.11.2021

Принята к публикации 19.01.2022

Для цитирования. Босиков И.И. Разработка метода анализа и гибридного имитационного моделирования сложных технических систем переменной структуры // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 1 (105). С. 25–40. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-25-40

ВВЕДЕНИЕ

Особенностями управления СТС ПС являются следующие: управление выполняется по параметрам с учетом условий безопасности без оптимизации эффективности;

представляет собой выработку и реализацию различных последовательностей управляющих решений по переходу в целевую ситуацию в зависимости от стратегии управления; неполнота и неопределенность данных о СТС, сложность формализации критериев эффективности управления СТС затрудняет реализацию соответствующих стратегий управления и достижение цели управления; выполнение дополнительных требований при переходе через промежуточные ситуации (например, для обеспечения безопасности); ошибки управления могут привести к выходу из строя СТС, к аварийным ситуациям и к негативным последствиям; необходимость адаптации управления к изменению структуры и параметров в процессе функционирования СТС, системных и внешних факторов; инерционный характер функционирования СТС, снижающий требования к оперативности управляющих воздействий; задачи и процессы моделирования и управления СТС, как правило, обособлены друг от друга. Вышесказанное позволяет обосновать целесообразность применения для управления СТС ситуационного подхода с учетом специфики имитационного моделирования [1–4].

В статье рассматривается метод анализа и имитационного гибридного моделирования СТС, ориентированный на особенности этих систем и их процессов в условиях неполноты информации, разнокачественных данных о состоянии и функционировании СТС, отличающийся сочетанием возможностей аналитического и структурно-параметрического подходов к построению имитационных гибридных моделей СТС, позволяющий осуществлять адаптацию к изменениям системных и внешних факторов, повысить точность моделирования.

Метод включает в себя следующие целевые показатели: построение иерархической сети; идентификацию текущей производственной ситуации СТС ПС; определение целевой ситуации, задание стратегии, поиск маршрутов для достижения целевой ситуации в зависимости от заданной стратегии; адаптацию иерархической сети к изменениям имитационной гибридной модели СТС ПС.

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка метода анализа и гибридного имитационного моделирования СТС ПС.

Постановка задачи имитационного гибридного моделирования СТС ПС заключается в следующем.

Проводим декомпозицию СТС ПС на общее количество элементов:

$$Sys = \{ E_1, \dots, E_N \},$$

где E_N – n -й элемент СТС ПС, $n = 1, \dots, N$.

Определяем признаки элементов СТС ПС и их величины:

$$P = \{ P_1, \dots, P_i \}. P_i = \{ P_i, \dots, P_{iV} \},$$

где P_i – i -й признак элементов СТС ПС; $\{ P_i, \dots, P_{iV} \}$ – величины P_i .

Рассмотренные элементы СТС ПС имеют множество групп требований:

$$\forall E_N \in Sys: R_N = \{ R_{N1}, \dots, R_{Ni} \},$$

где R_N – множество групп требований со стороны n -го элемента СТС ПС.

Далее необходимо разработать метод анализа и гибридного имитационного моделирования СТС ПС, позволяющий:

- уточнить типы математических моделей для анализа и моделирования элементов СТС ПС;

- подобрать математические модели для построения гибридной имитационной модели СТС ПС по результатам выявления групп требований к математическим моделям со стороны кластеров СТС ПС;

- провести кластерную оценку состояния СТС ПС и структурно-параметрическую настройку взаимосвязей между математическими моделями в гибридной имитационной модели СТС ПС [1–8, 11, 18].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реализуемый подход к моделированию СТС ПС основан на декомпозиции СТС ПС, логико-алгоритмическом описании поведения отдельных элементов системы и правил их взаимодействия, отображающих последовательность событий, возникающих в системе, на обоснованном выборе типов и разновидностей математических моделей, их объединении в гибридную имитационную модель СТС ПС с настройкой и адаптацией в процессе функционирования и управления [5–11].

С учетом особенностей СТС ПС проведена разработка метода анализа и имитационного гибридного моделирования СТС ПС.

Этап 1. Сбор и обработка информации о СТС ПС (о свойствах СТС ПС; кластерах СТС ПС; взаимосвязях между элементами СТС ПС; инертности СТС ПС; внешних и внутренних факторах, влияющих на функционирование СТС ПС).

Этап 2. Определение кластеров СТС ПС и выявление значимых элементов.

Шаг 1. Выявление и систематизация кластеров рассматриваемых элементов СТС ПС. Кластеры СТС ПС состоят из следующих показателей: показатели, характеризующие структуру и свойства элементов СТС ПС; показатели процессов; показатели, характеризующие внешнюю среду элементов СТС ПС.

Шаг 2. Оценка значимости показателей элементов СТС ПС. Оценка значимости показателей, влияющих на функционирование элементов СТС ПС, проводится по результатам обработанной информации о СТС ПС и по экспериментальным данным. На рисунке 1 показана компонентная схема вентиляционной системы угольной шахты [11–18].

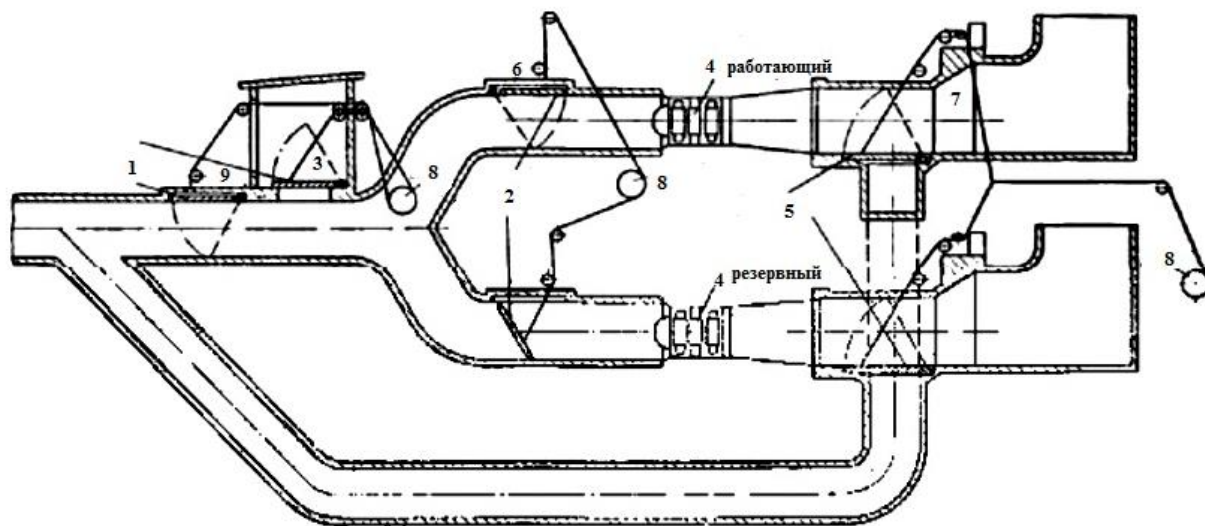


Рис. 1. Компонентная схема вентиляционной системы угольной шахты.

1 – подводящий канал, ляды всасывающей будки, фильтр; 2 – ляды переключения;

3 – дроссель с регулятором; 4 – работающий и резервный вентиляторы;

5 – ляды диффузоров, 6 – обратный и антипомпажный клапан; 7 – глушитель шума;

8 – лебедка ЛРУ-1; 9 – пускорегулирующая аппаратура

Этап 3. Разработка имитационной и параметрической моделей СТС ПС.

Шаг 1. Построение потокового параметрического графа СТС ПС, предназначенного для рассмотрения взаимодействия элементов при функционировании системы. Применение графа позволяет при перемене параметров и структурно-параметрических связей проанализировать и сопоставить различные конструктивные схемы СТС ПС, а также при построении гибридной композиционной модели СТС ПС минимизировать неопределенности. На рисунке 2 изображен потоковый граф вентиляционной системы угольной шахты [11–18].

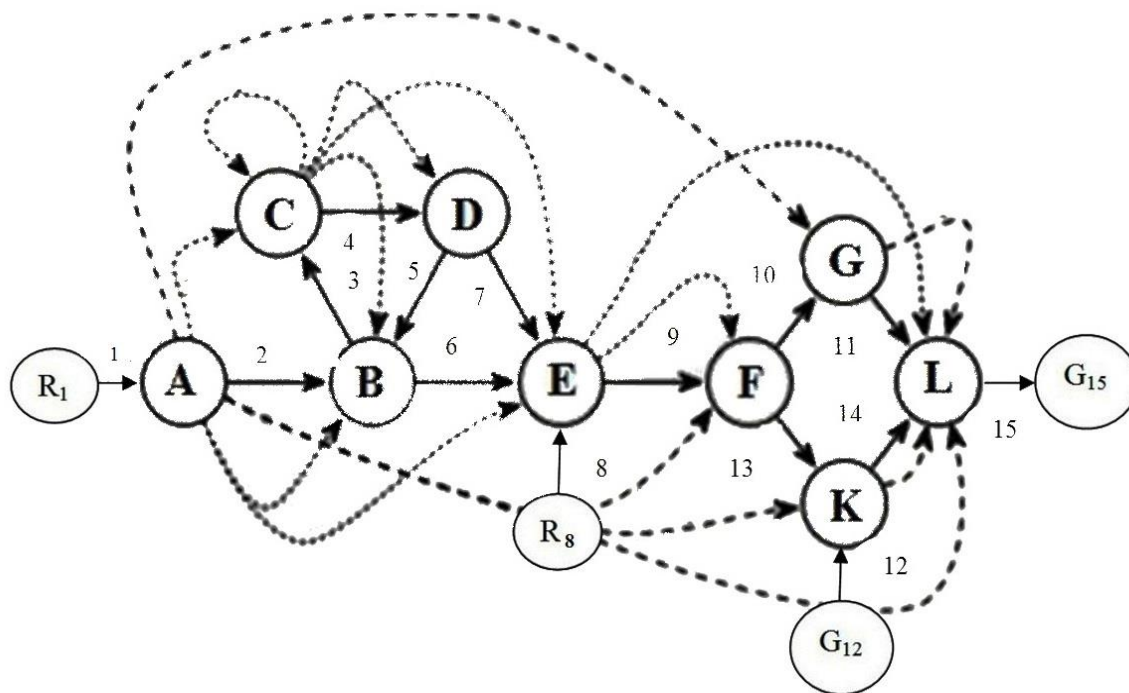


Рис. 2. Потоковый параметрический граф СТС ПС:

- A* – подводящий канал, лядя всасывающей будки, фильтр; *B* – лядя переключения;
- C* – дроссель с регулятором; *D* – работающий и резервный вентиляторы;
- E* – лядя диффузоров; *F* – обратный и антикомпажный клапан; *G* – глушитель шума;
- K* – лебедки ЛРУ-1; *L* – пускорегулирующая аппаратура.
- R*₁ – атмосферный воздух, *R*₈ – электрическая энергия для привода вентилятора,
- G*₁₂ – конденсат, отводимый из сжатого воздуха,
- G*₁₅ – сухой сжатый воздух в шахту, где *R* – источник энергоносителя, *G* – сток

Шаги 2–4. Построение матриц инцидентности, видов связи и смежности для СТС ПС. Для рассматриваемой схемы вентиляционной системы угольной шахты и ее потокового параметрического графа матрица инцидентности представлена в таблице 1, матрица видов связи СТС ПС (для определения наличия энергоносителей для каждого компонента СТС ПС) – в таблице 2, а матрица смежности СТС ПС (для определения контуров СТС ПС) – в таблице 3.

Матрица инцидентности – одна из форм представления графа, в которой указываются связи между инцидентными элементами графа (ребро (дуга) и вершина). Столбцы матрицы соответствуют ребрам, строки – вершинам. Ненулевое значение в ячейке матрицы указывает на связь между вершиной и ребром (их инцидентность).

Таблица 1

МАТРИЦА ИНЦИДЕНЦИЙ СТС ПС

Дуги	Компоненты СТС ПС								
	А	В	С	Д	Е	Ф	Г	К	Л
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	-1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	-1	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0
8	0	0	0	0	-1	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
12	0	0	0	0	0	0	1	0	0
13	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
15	0	0	0	0	0	-1	1	0	0

Таблица 2

МАТРИЦА ВИДОВ СВЯЗИ СТС ПС

Ветви	Энергоноситель								
	1 ^э	2 ^э	3 ^э	4 ^э	5 ^э	6 ^э	7 ^э	8 ^э	9 ^э
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0	0	0	0
7	0	1	0	0	1	0	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	1	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	1	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 3

МАТРИЦА СМЕЖНОСТИ СТС ПС

Узлы	Узлы								
	А	В	С	Д	Е	Ф	Г	К	Л
А	0	1	0	0	0	0	0	0	0
В	1	0	1	0	0	0	0	0	0
С	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Д	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Е	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Ф	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Г	0	0	0	0	0	0	0	0	1
К	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Л	0	0	0	1	1	0	0	1	0

Этап 4. Обоснование и выбор математических моделей для построения имитационной гибридной модели СТС ПС.

Шаг 1. Обоснование типов и оценка возможностей математических моделей для анализа и моделирования кластеров СТС ПС. В таблице 4 представлены типы математических моделей, а также соответствующие им значения признаков кластеров СТС ПС.

Шаг 2. Определение требований к математическим моделям для анализа и моделирования кластеров СТС ПС. Каждому из кластеров $Clust_i$ ($i = 1, \dots, n$) СТС ПС может быть сопоставлена одна или несколько групп требований к математическим моделям: $Clust_i$, $i = 1, \dots, n$: $\{R_{i,1}, R_{i,2}, \dots, R_{i,m}\}$, где m_i – число возможных групп требований к математическим моделям для представления $Clust_i$.

Таблица 4

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ НАБОРОВ ЗНАЧЕНИЙ ПРИЗНАКОВ КЛАСТЕРОВ
И ЭЛЕМЕНТОВ СТС ПС

Тип математической модели	Признаки кластеров и элементов СТС ПС				
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
Аналитические модели с четкими параметрами	$Y_{1,1}$	$Y_{2,1}$	$Y_{3,1}$	$Y_{4,1}$	$Y_{5,1}$
Аналитические модели с нечеткими параметрами	$Y_{1,2}$	$Y_{2,2}$	$Y_{3,2}$	$Y_{4,2}$	$Y_{5,2}$
Нечетко-логические модели	$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$	$Y_{3,1}$	$Y_{4,1}$	$Y_{5,1}$
Имитационные модели	$Y_{2,2}$	$Y_{2,3}$	$Y_{3,2}$	$Y_{4,2}$	$Y_{5,2}$
Аналитико-статистические модели	$Y_{2,3}$	$Y_{2,4}$	$Y_{3,3}$	$Y_{4,3}$	$Y_{5,3}$
Алгоритмы анализа и оценки надежности СТС ПС	$Y_{1,1}$	$Y_{2,1}$	$Y_{3,1}$	$Y_{4,1}$	$Y_{5,1}$
Алгоритмы формирования максимально полных подмножеств	$Y_{1,2}$	$Y_{2,2}$	$Y_{3,2}$	$Y_{4,2}$	$Y_{5,2}$
<p>Примечания: 1) Y_1 – представление зависимости между входными и выходными показателями: $\{Y_{1,1}$ – в аналитическом виде; $Y_{1,2}$ – в виде экспериментальных данных; $Y_{1,3}$ – в виде экспертных данных; $Y_{1,4}$ – смешанный характер}. 2) Y_2 – представление входных, выходных переменных кластеров СТС ПС: $\{Y_{2,1}$ – четкие входные и четкие выходные переменные; $Y_{2,2}$ – четкие входные и нечеткие выходные переменные; $Y_{2,3}$ – нечеткие входные и четкие выходные переменные; $Y_{2,4}$ – нечеткие входные и нечеткие выходные переменные}. 3) Y_3 – возможность получения дополнительных данных для уточнения зависимости между входными и выходными переменными в процессе функционирования: $\{Y_{3,1}$ – данные в виде уточняемых параметров аналитической зависимости; $Y_{3,2}$ – данные в виде обучающей выборки; $Y_{3,3}$ – данные в виде экспертных сведений; $Y_{3,4}$ – данные как в виде обучающей выборки, так и в виде экспертных сведений; $Y_{3,5}$ – получение каких-либо данных невозможно}. 4) Y_4 – возможность интерпретации зависимости между входными и выходными переменными кластера СТС ПС: $\{Y_{4,1}$ – интерпретация возможна; $Y_{4,2}$ – интерпретация невозможна; $Y_{4,3}$ – интерпретация неважна}. 5) Y_5 – факторный анализ кластеров и элементов СТС ПС: $\{Y_{5,1}$ – факторный анализ значимых показателей; $Y_{5,2}$ – факторный анализ невозможен; $Y_{5,3}$ – факторный анализ неважен}</p>					

В таблице 5 показан подбор групп требований к математическим моделям.

ПОДБОР ГРУПП ТРЕБОВАНИЙ К МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КЛАСТЕРОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СТС ПС

Кластеры СТС ПС	Группы требований	Требования				
		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
$Clust_1$	$R_{1,1}$	$Y_{1,1}$	$Y_{2,1}$	$Y_{3,1}$	$Y_{4,1}$	$Y_{5,1}$
	$R_{1,2}$	$Y_{1,2}$	$Y_{2,2}$	$Y_{3,2}$	$Y_{4,2}$	$Y_{5,2}$
$Clust_2$	$R_{2,1}$	$Y_{2,1}$	$Y_{2,2}$	$Y_{3,1}$	$Y_{4,1}$	$Y_{5,1}$
	$R_{2,2}$	$Y_{2,2}$	$Y_{2,3}$	$Y_{3,2}$	$Y_{4,2}$	$Y_{5,2}$
	$R_{2,3}$	$Y_{2,3}$	$Y_{2,4}$	$Y_{3,3}$	$Y_{4,3}$	$Y_{5,3}$
...
$Clust_n$	$R_{1,m}$	$Y_{1,1}$	$Y_{2,1}$	$Y_{3,1}$	$Y_{4,2}$	$Y_{5,2}$
	$R_{1,m}$	$Y_{1,2}$	$Y_{2,2}$	$Y_{3,2}$	$Y_{4,3}$	$Y_{5,3}$

Шаг 3. Выбор совокупности математических моделей и алгоритмов для построения имитационной гибридной модели СТС ПС. На основании результатов сопоставления групп требований к математическим моделям со стороны кластеров СТС ПС определяются совокупности математических моделей, образующих «дерево покрытия» СТС ПС (рис. 3).

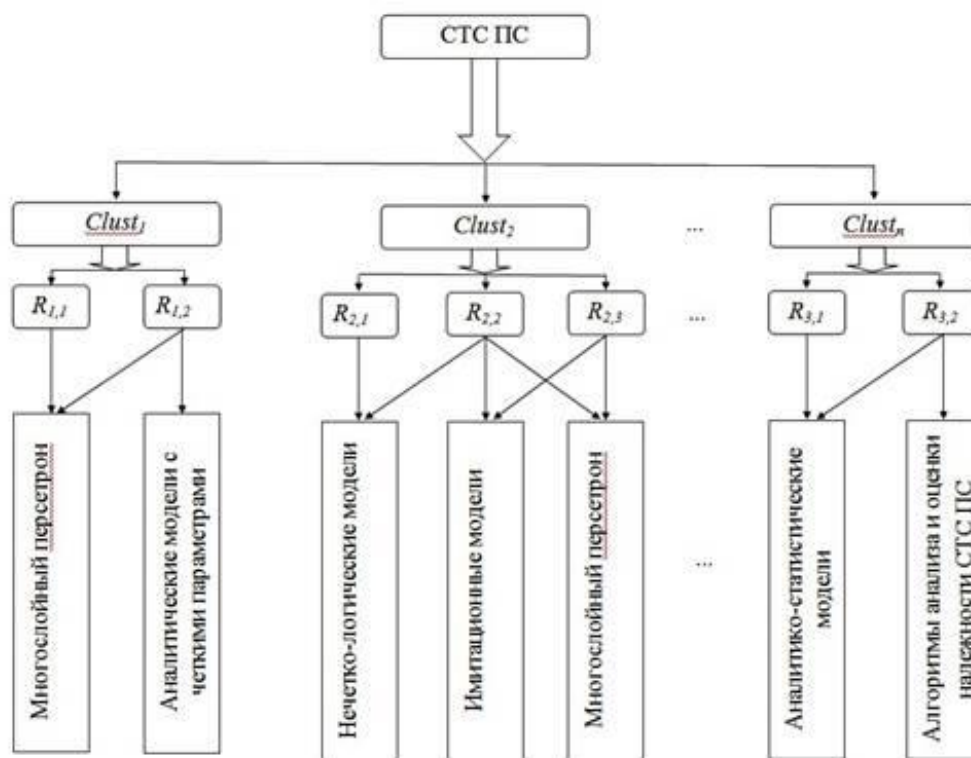


Рис. 3. «Дерево покрытия» СТС ПС математическими моделями

После определения «дерева покрытия» СТС ПС математическими моделями осуществляется выбор типа математических моделей, наиболее рационально позволяющих построить имитационную гибридную модель СТС ПС в целом. Выбор такого подмножества математических моделей может быть осуществлен в соответствии с различными критериями рационального выбора, например: максимизация степени пригодности математической модели, максимизация минимальной пригодности, максимизация средней пригодности, минимизация мощности «покрытия» [15–19].

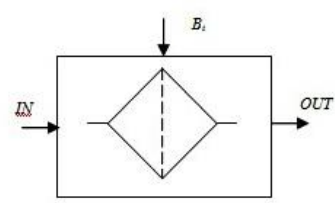
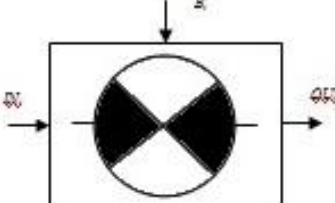
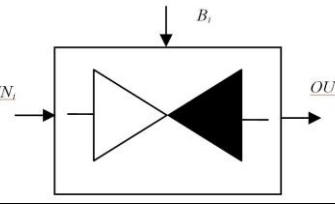
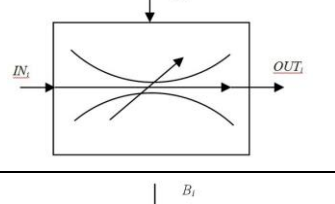
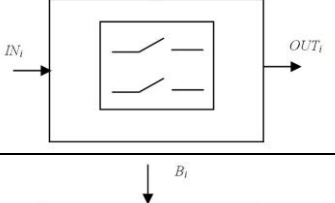
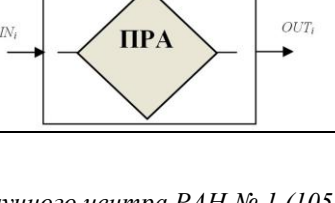
Этап 5. Построение математических моделей различных типов для описания всех кластеров и элементов СТС ПС:

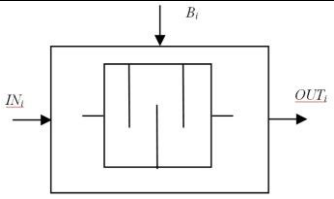
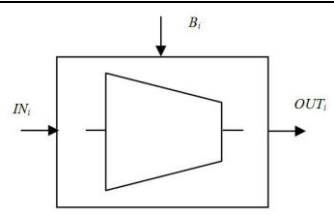
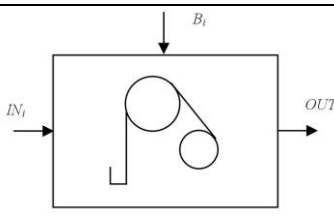
- аналитические модели СТС ПС с четкими параметрами;
- аналитические модели СТС ПС с нечеткими параметрами;
- нечетко-логические модели;
- имитационные модели;
- аналитико-статистические модели;
- алгоритмы анализа и оценки надежности СТС ПС.

Для построения имитационной гибридной модели СТС ПС формируется база соответствующих математических моделей. Для создания имитационной гибридной модели вентиляционной системы шахты реализован набор математических моделей, типы и разновидности которых представлены в таблице 6.

Таблица 6

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ
ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ**

Кластеры и элементы СТС ПС	Обозначение	Тип математической модели
Подводящий канал (фильтр)		Аналитическая модель с четкими параметрами
Работающий и резервный вентилятор		Имитационная модель
Обратный и антипомпажный клапан		Нечетко-логическая модель
Дроссель с регулятором		Нечетко-логическая модель
Ляды переключения		Нечетко-логическая модель
Пускорегулирующая аппаратура		Аналитико-статистическая модель

Глушитель шума		Нечетко-логическая модель
Ляды диффузоров		Нечетко-логическая модель
Лебедка ЛРУ-1		Аналитическая модель с четкими параметрами
<p>Примечание. Для всех перечисленных математических моделей разработаны и усовершенствованы методики их построения и структурно-параметрической настройки.</p>		

Этап 6. Формирование структуры имитационной гибридной модели СТС ПС на основе объединения построенных математических моделей. Структурно-параметрическая настройка взаимосвязей между математическими моделями в гибридной имитационной модели СТС ПС. При объединении математических моделей в единую математическую модель СТС ПС, отображающую взаимосвязанные процессы, входы IN_i «последующих» элементов соединяются с выходами OUT_{i-1} «предыдущих». Объединяя математические модели в соответствии с их взаимосвязями, а также используя информацию, полученную на предыдущих этапах разработанного метода, создается гибридная имитационная модель СТС ПС. На рисунке 4 показана структура имитационной гибридной модели вентиляционной системы угольной шахты [18–24].

Этап 7. Мониторинг состояния кластеров СТС ПС, структурно-параметрическая настройка и изменение типов математических моделей. Параметры кластеров СТС ПС, их состояние, происходящие в них процессы постоянно изменяются. Если в результате мониторинга выявлено несоответствие между выходными данными математических моделей (и гибридной имитационной модели в целом) с данными, полученными с приборов и датчиков СТС ПС, то эти изменения должны учитываться в математической модели СТС ПС [11–19]. В ходе мониторинга состояния кластеров СТС ПС осуществляется:

- оценка точности моделирования кластеров СТС ПС соответствующими математическими моделями, в зависимости от результатов которой выполняется параметрическая, структурно-параметрическая настройка или замена соответствующих разновидностей моделей, а также переход на математические модели других типов, обеспечивающих требуемую точность с учетом накапливаемых данных о функционировании СТС ПС, в том числе в нештатных, аварийных ситуациях и при изменении внешних факторов;

- оценка накапливаемых данных о кластерах СТС ПС для изменения типов соответствующих математических моделей в зависимости от потребности в обеспечении их предпочтительных свойств (например: снижение объема и сложности вычислений; повышение скорости обработки и получения результатов моделирования; обеспечение интерпретируемости/«прозрачности» результатов).

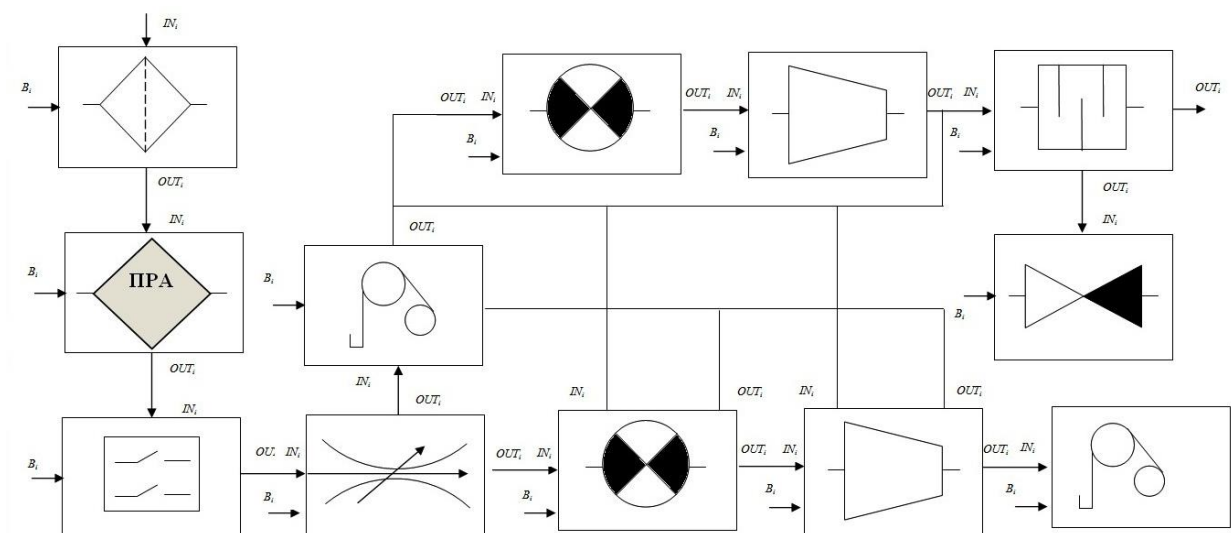


Рис. 4. Структура имитационной гибридной модели
вентиляционной системы угольной шахты

В таблице 7 охарактеризованы ситуации мониторинга состояния кластеров СТС ПС, механизмы их идентификации, причины и возможные меры по обеспечению заданной точности моделирования.

Таблица 7

ХАРАКТЕРИСТИКА СИТУАЦИЙ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КЛАСТЕРОВ СТС ПС

Ситуация мониторинга	Характеристика ситуации	Механизм идентификации	Меры по обеспечению заданной точности моделирования
Состояние 1. Моделирование кластеров и элементов СТС ПС осуществляется с заданной точностью	Данные соответствуют результатам моделирования; отсутствует необходимость параметрической настройки математической модели	Периодическое, обусловленное спецификой элемента СТС ПС сопоставление результатов функционирования и моделирования	Ситуация не требует принятия каких-либо мер
Состояние 2. Постепенное ухудшение точности моделирования кластеров СТС ПС	Данные постепенно изменяются и перестают соответствовать заданной точности моделирования с используемой математической модели	Периодическое сопоставление результатов функционирования и моделирования; возможна превентивная идентификация этой ситуации на основе прогнозной оценки ухудшения точности моделирования	Выбор (из набора ранее построенных и настроенных моделей) имитационной модели и при необходимости ее структурно-параметрическая доработка
Состояние 3. Кратковременное ухудшение точности моделирования кластеров СТС ПС	Происходит кратковременное ухудшение и последующее обеспечение заданной точности моделирования	Возможные причины ситуации: нештатная ситуация; сбой оборудования	Информирование о возникшей ситуации. Анализ причин и учет сведений о возникшей ситуации для доработки математических моделей
Состояние 4. Резкое ухудшение точности моделирования кластеров СТС ПС	Происходит резкое ухудшение заданной точности моделирования	Возможные причины ситуации: нештатная или аварийная ситуация; сбой или выход из строя оборудования; резкое изменение внешних факторов	Информирование о возникшей ситуации и применение мер структурного резервирования СТС ПС

В таблице 8 представлены примеры сформулированных эмпирических правил изменения типов математических моделей, апробированные на практических задачах моделирования вентиляционной системы угольной шахты.

Таблица 8

ПРИНЦИПЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТИПОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Имитационная модель → Аналитическая модель с четкими параметрами	Аналитическая модель с четкими параметрами → Имитационная модель
Анализ 1-го состояния элементов и кластеров СТС ПС	Анализ 2-го, 3-го и 4-го состояния элементов и кластеров СТС ПС
Отсутствие необходимости параметрической настройки математической модели	Возможность параметрической и структурно-параметрической настройки в фоновом режиме на основе постоянно накапливаемой актуальной информации (в виде обучающей выборки) о состоянии и функционировании элементов СТС ПС (в том числе о нештатных и аварийных ситуациях)
Возможность снизить объем и повысить скорость вычислений	
Нечетко-логическая модель → Аналитико-статистическая модель	Аналитико-статистическая модель → Нечетко-логическая модель
Анализ 2-го, 3-го и 4-го состояния элементов и кластеров СТС ПС	Анализ 1-го состояния элементов и кластеров СТС ПС
Возможность параметрической и структурно-параметрической настройки в фоновом режиме на основе постоянно накапливаемой актуальной неопределенной информации (в виде обучающей выборки, состоящей из примеров) о состоянии и функционировании компонентов СТС ПС (в том числе о нештатных и аварийных ситуациях)	Отсутствие необходимости параметрической настройки имитационной модели
	Возможность снизить объем и повысить скорость вычислений

ВЫВОДЫ (ЗАКЛЮЧЕНИЕ)

Разработан метод анализа и имитационного гибридного моделирования СТС ПС, формирование структуры происходит на основе укрупнения математических моделей и структурно-параметрической настройки взаимосвязей между аналитико-статистическими моделями в имитационной гибридной модели СТС ПС. Предложенный метод разработан с учетом особенностей СТС ПС в условиях неполноты информации, экспериментальных данных о состоянии и функционировании СТС ПС, которая отличается тем, что возможно осуществлять: адаптацию к изменениям показателей СТС ПС; идентификацию текущей ситуации СТС ПС; определение целевой ситуации, задание стратегии, поиск маршрутов для достижения выбранной цели в зависимости от заданной стратегии [15-19].

Созданный метод обеспечивает повышение эффективности управления СТС ПС с учетом специфики математического моделирования и различных стратегий эффективного ситуационного управления этими системами в зависимости от складывающихся условий и предъявляемых требований, а также обеспечивает органичное объединение процессов имитационного моделирования и ситуационного управления. Эффективность использования предложенного метода оценена на примере анализа, имитационного моделирования и ситуационного управления воздухораспределением главной вентиляторной установкой угольной шахты № 31 Ростовской области и заключается в снижении энергозатрат, в по-

вышении их ресурса за счет более устойчивых режимов работы и в расширении области рабочих характеристик вентиляционных систем и сужения зон запаса на регулирование.

Направлениями дальнейших исследований планируем следующее: анализ возможностей упрощения разработанных методов и создание на основе такого анализа приближенных методов, позволяющих сравнивать различные схемные решения и выбирать наилучший вариант; анализ различных технических систем с целью конкретизации разработанных методов; широкая публикация разработанных методов и программных средств с целью их широкого внедрения в инженерную практику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пучков Л.А., Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Системные решения обеспечения метанобезопасности угольных шахт // Горный журнал. 2014. № 5. С. 12–14.
2. Semin M.A., Levin L.Yu. Stability of air flows in mine ventilation networks // Process Safety and Environmental Protection, 2019. Vol. 124. Pp. 167–171. DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.006.
3. Thakur P. 1 - Underground Coal Mine Atmosphere. Advanced Mine Ventilation // Respirable Coal Dust, Combustible Gas and Mine Fire Control, 2019. Pp. 3–16. DOI: 10.1016/B978-0-08-100457-9.00001-8.
4. Cheng L., Guo H., Lin H. Evolutionary model of coal mine safety system based on multi-agent modeling // Process Safety and Environmental Protection, 2021. Vol. 147. Pp. 1193–1200. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.046.
5. Esterhuizen G.S., Gearhart D.F., Klemetti T. et al. Analysis of gateroad stability at two longwall mines based on field monitoring results and numerical model analysis // International Journal of Mining Science and Technology, 2019, Vol. 29. No. 1. Pp. 35–43. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.021.
6. Wang K., Jiang Sh., Wu Zh. et al. Intelligent safety adjustment of branch airflow volume during ventilation-on-demand changes in coal mines // Process Safety and Environmental Protection, 2017. Vol. 111. Pp. 491–506. DOI: 10.1016/j.psep.2017.08.024.
7. Qiao W. Analysis and measurement of multifactor risk in underground coal mine accidents based on coupling theory // Reliability Engineering & System Safety, 2021. Vol. 208. No. 107433. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107433.
8. Zhang L., Zhou G., Ma Yu et al. Numerical analysis on spatial distribution for concentration and particle size of particulate pollutants in dust environment at fully mechanized coal mining face // Powder Technology, 2021. Vol. 383. Pp. 143–158. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.01.039.
9. Ключев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В. и др. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. № 2. С. 283–290.
10. Жилов Р.А. Применение нейронных сетей при кластеризации данных // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 1 (99). С. 15–19. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-1-99-15-19.
11. Босиков И.И. Разработка универсальной аналитико-статистической модели расчета показателей надежности и комплексной оценки сложных технических систем переменной структуры // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 4 (102). С. 17–27. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-4-102-17-27.
12. Машиңцов Е.А., Котлеревская Л.В., Криничная Н.А. Управление вентиляцией в угольной шахте // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 7. С. 188–195.

13. *Kozhiev H.H., Klyuev R.V., Bosikov I.I. et al.* Analysis of management of mine ventilation networks using simulation models // *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2017. Vol. 9. No. 4 (34). Pp. 414–418.
14. *Скопинцева О.В., Баловцев С.В.* Управление аэрологическими рисками угольных шахт на основе статистических данных системы аэрогазового контроля // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 1. С. 78–89. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-78-89.
15. *Каледина Н.О.* Обоснование параметров систем вентиляции высокопроизводительных угольных шахт // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 7. С. 261–271.
16. *Бахвалов Л.А., Баранникова И.В., Агабубаев А.Т.* Анализ современных систем автоматического управления проветриванием // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 7. С. 22–28.
17. *Босиков И.И., Ключев Р.В., Хетагуров В.Н. и др.* Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021. № 1. С. 77–83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.
18. *Борисов В.В., Авраменко Д.Ю.* Нечеткое ситуационное управление сложными системами на основе их композиционного гибридного моделирования // *Системы управления, связи и безопасности*. 2021. № 3. С. 207–237. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-207-237.
19. *Васенин И.М., Шрагер Э.Р., Крайнов А.Ю. и др.* Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2011. Т. 3. № 2. С. 155–163.
20. *Машиинцов Е.А., Котлеревская Л.В., Криничная Н.А.* Управление вентиляцией в угольной шахте // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2014. № 7. С. 188–195.
21. *Харик Е.К., Астанин А.В.* Численное исследование вентиляции горной выработки угольной шахты в трехмерной постановке // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 4–5. С. 2567–2569.
22. *Рычковский В.М., Сергеев О.А., Тюрин В.П.* Об управлении вентиляцией на угольных шахтах Кузбасса // *Безопасность труда в промышленности*. 2004. № 11. С. 8–9.
23. *Sjöström S., Klintonäs E., Johansson P. et al.* Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption // *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020. Vol. 30. Issue 4. Pp. 533–539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016.
24. *Гурин А.А., Шаповалов В.А., Ляшенко В.И.* Повышение безопасности работы систем аспирации и вентиляции путем очистки воздухопроводов // *Безопасность труда в промышленности*. 2021. № 1. С. 40–45.

Информация об авторе

Босиков Игорь Иванович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет);

362021, Россия, Владикавказ, ул. Николаева, 44;

докторант Астраханского государственного технического университета;

414056, Россия, Астрахань, ул. Татищева, 16;

igor.boss.777@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8930-4112>

REFERENCES

1. Puchkov L.A., Kaledina N.O., Kobylkin S.S. System solutions to ensure methane safety of coal mines. *Gornyy zhurnal* [Gornyy zhurnal]. 2014. No 5. Pp. 12–14. (in Russian)
2. Semin M.A., Levin L.Yu. Stability of air flows in mine ventilation networks. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019. Vol. 124. Pp. 167–171. DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.006.
3. Thakur P. 1 - Underground Coal Mine Atmosphere. *Advanced Mine Ventilation. Respirable Coal Dust, Combustible Gas and Mine Fire Control*. 2019. Pp. 3–16. DOI: 10.1016/B978-0-08-100457-9.00001-8.
4. Cheng L., Guo H., Lin H. Evolutionary model of coal mine safety system based on multi-agent modeling. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021. Vol. 147. Pp. 1193–1200. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.046.
5. Esterhuizen G.S., Gearhart D.F., Klemetti T. et al. Analysis of gate road stability at two longwall mines based on field monitoring results and numerical model analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019. Vol. 29. No. 1. Pp. 35–43. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.021.
6. Wang K., Jiang Sh., Wu Zh. et al. Intelligent safety adjustment of branch airflow volume during ventilation-on-demand changes in coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017. Vol. 111. Pp. 491–506. DOI: 10.1016/j.psep.2017.08.024.
7. Qiao W. Analysis and measurement of multifactor risk in underground coal mine accidents based on coupling theory. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 208. No. 107433. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107433.
8. Zhang L., Zhou G., Ma Yu et al. Numerical analysis on spatial distribution for concentration and particle size of particulate pollutants in dust environment at fully mechanized coal mining face. *Powder Technology*, 2021. Vol. 383. Pp. 143–158. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.01.039.
9. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V. et al. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Ustoychivoye razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories]. 2020. No. 2. Pp. 283–290. (in Russian)
10. Zhilov R.A. Application of neural networks in data clustering. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN* [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS]. 2021. No. 1 (99). Pp. 15–19. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-1-99-15-19. (in Russian)
11. Bosikov I.I. Development of a universal analytical and statistical model for calculating reliability indicators and a comprehensive assessment of complex technical systems of variable structure. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN* [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS]. 2021. No. 4 (102). Pp. 17–27. DOI: 10.35330/1991-6639-2021-4-102-17-27. (in Russian)
12. Mashintsov E.A., Kotlerevskaya L.V., Krinichnaya N.A. Ventilation control in a coal mine. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of the Tula State University. Technical sciences]. 2014. No. 7. Pp. 188–195. (in Russian)

13. Kozhiev H.H., Klyuev R.V., Bosikov I.I. et al. Analysis of management of mine ventilation networks using simulation models. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2017. Vol. 9. No. 4 (34). Pp. 414–418.
14. Skopintseva O.V., Balovtsev S.V. Management of aerological risks of coal mines based on statistical data of the air-gas control system. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2021; No. 1. Pp. 78–89. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-78-89. (in Russian)
15. Kaledina N.O. Substantiation of the parameters of ventilation systems in high-performance coal mines. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2011. No. 7. Pp. 261–271. (in Russian)
16. Bahvalov L.A., Barannikova I.V., Agabubayev A.T. Analysis of modern systems of automatic control of ventilation. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2017. No. 7. Pp. 22–28. (in Russian)
17. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N. et al. Development of methods and management of tools of aerogas dynamics processes at mining sites. *Ustoychivoye razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories]. 2021. No. 1. Pp. 77–83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83. (in Russian)
18. Borisov V.V., Avramenko D.Yu. Fuzzy situational control of complex systems based on composite hybrid modeling. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control of Communication and Security]. 2021. No. 3. Pp. 207–237. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-207-237. (in Russian)
19. Vasenin I.M., Shrager E.R., Krainov A.Yu. et al. Mathematical modeling of non-stationary ventilation processes of the coal mine workings network. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling]. 2011. Vol. 3. No. 2. Pp. 155–163. (in Russian)
20. Mashintsov E.A., Kotlrevskaya L.V., Krinichnaya N.A. Management of ventilation in the coal mine. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of the Tula State University. Technical science]. 2014. No. 7. Pp. 188–195. (in Russian)
21. Kharik E.K., Astanin A.V. Numerical study of ventilation of a coal mine in a three-dimensional setting. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University n.a. N.I. Lobachevsky]. 2011. No. 4–5. Pp. 2567–2569. (in Russian)
22. Rychkovsky V.M., Sergeev O.A., Tyurin V.P. On ventilation control at coal mines of of Kuzbass. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti* [Safety of labor in industry]. 2004. № 11. Pp. 8–9. (in Russian)
23. Sjöström S., Klintonäs E., Johansson P. et al. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020. Vol. 30. No. 4. Pp. 533–539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016.
24. Gurin A.A., Shapovalov V.A., Lyashenko V.I. Improving the safety of operation of aspiration and ventilation systems by cleaning air ducts. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Safety of work in industry]. 2021. No. 1. Pp. 40–45. (in Russian)

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF ANALYSIS AND HYBRID SIMULATION MODELING OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS OF VARIABLE STRUCTURE

I.I. BOSIKOV^{1,2}

¹North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)
362021, Russia, Vladikavkaz, 44 Nikolaev street

²Astrakhan State Technical University
414056, Russia, Astrakhan, 16 Tatishchev street

Abstract. The article describes the method of analysis and hybrid simulation of complex technical systems of variable structure (CTS VS), which includes: collection and generalization of information about the STS SS; selection of clusters and elements of CTS VS and identification of their significant indicators; creation of a logical model of CTS VS; substantiation and selection of mathematical models for constructing a simulation hybrid model of CTS VS; construction of mathematical models of various types to describe all components of the CTS VS and assessment of the reliability of modeling clusters and elements of the STS of the PS using the constructed mathematical models; formation of the structure of the simulation hybrid model of the CTS VS based on the combination of the constructed mathematical models and structural and parametric adjustment of the relationships between mathematical models in the simulation hybrid model of the CTS VS monitoring of the state of clusters and elements of CTS VS, structural and parametric tuning and changing the types of mathematical models.

The aim of the work is to develop a method of analysis and hybrid simulation modeling of CTS VS.

The novelty lies in the fact that the proposed method is focused on the features of the CTS VS of the class under consideration in conditions of incomplete information, different-quality data on the state and functioning of the CTS VS, differs from the known ones by combining the capabilities of analytical, analytical-statistical and simulation approaches to building simulation hybrid models of the CTS VS, allows you to adapt to changes in systemic and external factors, improve the accuracy of modeling, and also typify the presentation of characteristic situational features for effective management of CTS.

Keywords: complex technical system of variable structure, hybrid simulation model, systemic and external factors, clusters, mathematical models, situational features, ventilation system of coal mines

The article was submitted 25.11.2021

Accepted for publication 19.01.2022

For citation. Bosikov I.I. Development of the method of analysis and hybrid simulation modeling of complex technical systems of variable structure. News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS. 2022. No. 1 (105). Pp. 25–40. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-25-40

Information about the author

Bosikov Igor Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Oil and Gas Business, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University);

362021, Russia, Vladikavkaz, 44 Nikolaev street;

Doctoral student of Astrakhan State Technical University;

414056, Russia, Astrakhan, 16 Tatishchev street;

igor.boss.777@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8930-4112>