

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-1-49-58

УДК 519.876.5 : 622.23.05 + 519.686

### РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ШАГАЮЩЕЙ КРЕПИ С ИНТЕГРАЦИЕЙ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF THE WALKING ROOF SUPPORT WITH INTEGRATED CONTROL ALGORITHMS FOR VISUALIZING MINING PROCESSES

**Никитенко Михаил Сергеевич<sup>1,3</sup>**

кандидат техн. наук, старший преподаватель

e-mail: schum24@rambler.ru

**Mikhail S. Nikitenko<sup>1,3</sup>**

C.Sc. in Engineering, Senior Lecturer

**Журавлев Сергей Сергеевич<sup>2</sup>**

младший научный сотрудник, e-mail: s-zhur@yandex.ru

**Sergey S. Zhuravlev<sup>2</sup>**

Junior Researcher

**Малахов Юрий Валентинович<sup>1</sup>**

ведущий инженер, e-mail: yv.malakhov@mail.ru

**Yuriy V. Malakhov<sup>1</sup>**

Senior Engineer

**Абабков Николай Викторович<sup>3</sup>**

кандидат техн. наук, доцент

e-mail: n.ababkov@rambler.ru

**Nikolay V. Ababkov<sup>3</sup>**

C.Sc. in Engineering, Associate Professor

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, 650000, Россия, г.

Кемерово, пр-т Советский, 18

<sup>1</sup>Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS, 18 Sovetskiy Ave., Kemerovo,

650000, Russian Federation

<sup>2</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т

Академика Лаврентьева, 6

<sup>2</sup>The Institute of Computational Technologies SB RAS, 6 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090,

Russian Federation

<sup>3</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,

г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>3</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000,

Russian Federation

**Аннотация:** В статье рассмотрена актуальная тема создания человеко-машинных систем для эффективного управления сложными технологическими объектами. В качестве объекта исследования выступает модуль шагающей крепи, как основная единица забойного оборудования для обеспечения технологического процесса безлюдной отработки крутых мощных пластов подэтажными штреками. Предмет исследования – имитационная модель шагающей крепи с интеграцией алгоритмов управления для

визуализации технологических процессов. Цель исследования состоит в создании интерактивного, информативного трехмерного образа шагающего модуля для отображения текущего состояния и формирования визуальных стимулов восприятия у оператора диспетчерского пульта. Для достижения цели применены методы САД-проектирования, имитационного моделирования, теории графов и теории алгоритмов. В результате, на основе кинематических схем и алгоритма функционирования, созданы: структура имитационной модели, кинематический расчет элементов конструкции, модель алгоритма управления шагающим модулем, модель алгоритма управления гидроприводом, интегрированная трехмерная модель крепи. Такая имитационная модель позволяет решить задачу согласованного формирования тестовых сигналов для отладки перспективных систем автоматизации комплексов шагающих крепей, также применить её в составе специализированного имитационного программно-технического комплекса отладки и тестирования прикладного программного обеспечения АСУ ТП.

**Ключевые слова:** имитационная модель, Matlab, тестирование алгоритмов, технологическое оборудование, интерактивная модель, трехмерный образ, механизированная крепь, шагающая крепь, мобильное место оператора, диспетчер, человеко-машинный интерфейс (ЧМИ), нейрокомпьютерный интерфейс (НКИ)

**Abstract:** The article describes the topical issue of creating man-machine systems for the effective control of complex technological objects. The object of the research is the walking support module, as the main unit of mining support equipment for technology of development steeply inclined thick coal seams by sub-level benching. The subject of the study is a simulation model of walking support with integrated control algorithms for visualizing mining technological processes. The purpose of the study is to create an interactive, informative three-dimensional model of the walking support module. To achieve the aim, the methods of CAD-design, simulation, graph theory, theory of algorithms are applied. As a result, on the basis of the kinematic schemes and the functioning algorithm, the structure of the simulation model, the kinematic calculation of the structural elements, the model of the walking support module control algorithm, the model of the hydraulic control algorithm, an integrated three-dimensional walking support model were created. This simulation model allows us to solve the problem of coordinated formation of test signals for debugging the promising automation systems of walking support complexes, and also to apply it as a part of the specialized simulation software and hardware complex for debugging and testing APCS application software.

**Key words:** simulation model, Mathlab, algorithm test, technological equipment, interactive model, 3D image, powered roof support, walking support, mobile operator position, dispatcher, human-machine interface (HMI), brain-computer interface (BCI).

Разработка мощных крутонаклонных угольных пластов исторически сдерживалась отсутствием высокопроизводительных очистных комплексов и эффективной, безопасной технологии добычи. Одним из направлений решения этой проблемы является применение технологии отработки подэтажными штреками и обеспечивающего её технологического оборудования, типа «крепь-штрек», перемещаемого по мере подсечки подэтажной толщи, по подэтажному штреку по простиранию пласта [1–3]. В технологии отработки подэтажными штреками эксплуатационными выработками являются штреки, пройденные по почве пласта в нижней части каждой эксплуатационной панели. В конце штрека установлено забойное технологическое оборудование, обеспечивающие крепление штрека и защиту скребкового конвейера для транспортировки угля [4].

Варианты оборудования «крепь-штрек» для подэтажной выемки ранее разрабатывались и изготавливались на Киселевском машиностроительном заводе им. Черных, Сибгормаш, КузНИУИ и прошли успешные испытания на угольных шахтах [2]. Позднее, такой тип оборудования и технологию успешно применяли в условиях польской шахты

«Казимеж Юлиуш» на пласте мощностью 20 м с углом падения 45° [5–6].

На сегодняшний день, в качестве одного из вариантов крепления выработки типа «крепь-штрек» для создания эффективного отечественного очистного комплекса и отработки крутых пластов подэтажами с выпуском является шагающая крепь [7–8]. Конструкция гидрофицированного шагающего модуля позволяют максимально автоматизировать процесс управления [9], рассматривать в рамках выполняемого проекта шагающий модуль в качестве основного забойного оборудования для обеспечения технологического процесса безлюдной отработки и реализовать на его примере концепцию мобильного места оператора с применением оборудования на основе нейрокомпьютерного интерфейса (НКИ) [10].

В целях создания взаимосвязи человека и машины, интеграции НКИ в систему управления для контроля технологического процесса выемки, диспетчера необходимо обеспечить интерактивным и информативным образом шагающей крепи на мониторе для вывода эксплуатационных параметров и формирования визуальных стимулов восприятия. Создание информативного, интуитивно понятного

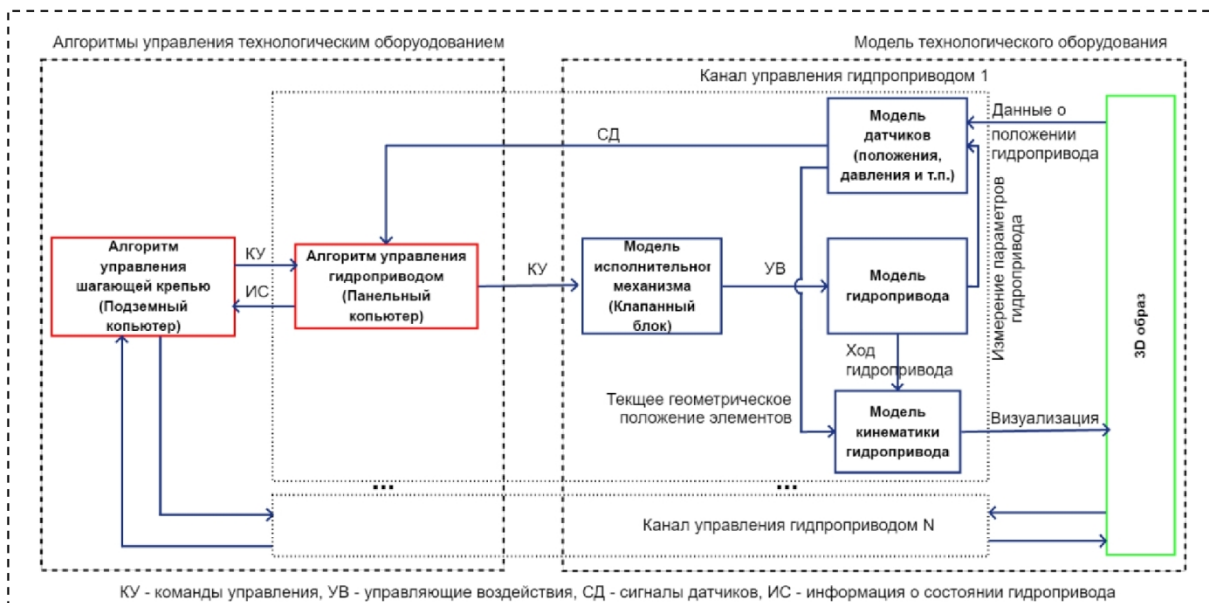


Рис. 1. Структура имитационной модели шагающей крепи  
 Fig. 1. Structure of walking support simulation model

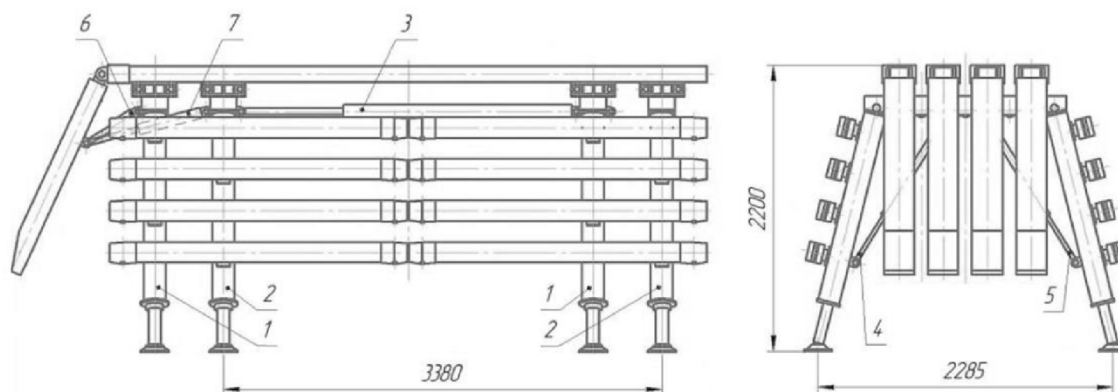


Рис. 2. Конструкция шагающего модуля крепи  
 Fig. 2. Walking support design

виртуального трехмерного образа с анимацией движения элементов конструкции потребовало разработки имитационной модели модуля шагающей крепи с интегрированными алгоритмами управления. Кроме того, математическое описание модуля шагающей крепи при разработке имитационной модели также позволит решить задачу согласованного формирования тестовых сигналов для будущей отладки систем автоматизации комплексов шагающих крепей [11]. Также применить её в составе специализированного имитационного программно-технического комплекса отладки и тестирования прикладного программного обеспечения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) подземной разработки месторождений полезных ископаемых.

Математическое моделирование широко применяется в задачах отладки и тестирования алгоритмов программ управления. Известны такие работы российских и зарубежных ученых:

моделирование канала связи командно-измерительной системы космического аппарата [12]; модельно-ориентированное проектирование системы автоматического управления температурой с циркуляцией промежуточного теплоносителя [13]; прототипирование систем управления как части модельно-ориентированной разработки теплового насоса сушилки [14]; управление встроенной моделью в полунатурном моделировании для промышленных беспроводных сетей предприятий с применением WirelessHART стандарта [15] и др.

Процесс математического моделирования начат с разработки концепции анимированной демонстрации, обеспечивающей визуализацию заданного алгоритма управления исполнительными механизмами шагающей крепи. Структура имитационной модели представлена на рисунке 1.

На структуре имитационной модели модуля шагающей крепи приведены взаимосвязи между



Таблица 1. Перечень технических средств обеспечения и контроля подвижности  
 Table 1. The list of technical means to enable and control the walking support mobility

Кол-во	Назначение технических средств	Кол-во	Назначение технических средств
<b>ГЦ и датчики уровня давления</b>		<b>Датчики положения линейные</b>	
4 шт.	управление козырьками	8 шт.	контроль положения опор по высоте
8 шт.	контроль распора по высоте	8 шт.	контроль положения опор по ширине
8 шт.	контроль распора по ширине	2 шт.	контроль передвижки
3 шт.	контроль передвижки секций	<b>Датчик уровня (гироскоп)</b>	
<b>Датчики положения угловые</b>		2 шт.	контроль горизонта
4 шт.	контроль угла наклона козырьков		

алгоритмами АСУ ТП, моделями структурных элементов модуля (кинематика гидроприводов (ГП), исполнительного механизма, ГП и датчиков) и визуальной составляющей.

Алгоритм управления шагающей крепью осуществляет согласованное функционирование каналов управления ГП модуля шагающей крепи. Алгоритм управления ГП формирует команду управления (КУ) для исполнительного механизма, который генерирует управляющее воздействие (УВ) на модель ГП. На выходе модели ГП формируется количественное значение хода гидроцилиндра ГП, поступающее в модель кинематики. Далее осуществляется отображение измененного состояния трехмерного образа модуля шагающей крепи и обновление сигналов датчиков (СД).

Исходными данными для моделирования являлось описание кинематики конструкции, начальное и конечное положение элементов которой обеспечивается рядом гидроцилиндров (ГЦ), показанных на рисунке 2, где 1 – опоры 1-й секции (ГП 1-2 передние, 3-4 задние 1-й секции); 2 – опоры 2-й секции; 3 – ГЦ передвижки; 4, 5 – ГЦ распора секций по ширине (ГП 5-6 передние опоры, 7-8 задние опоры 1-й секции); 6 – домкраты козырьков 1-й секции (ГП 1 и 3 козырьков); 7 – домкраты козырьков 2-й секции (ГП 2 и 4 козырьков).

Для обеспечения и контроля кинематической подвижности шагающей крепи принят необходимым и достаточным перечень технических средств, который приведен в таблице 1.

На основании описания кинематики модуля шагающей крепи произведен расчет координат для элементов его конструкции. Ниже рассмотрен расчет на примере ГП козырьков первой (передней) секции. ГП козырьков секции работают синхронно, расчет для козырьков первой и второй (задней) секции аналогичен. Далее приведено описание для одного из козырьков первой секции.

Кинематическая схема ГП козырька первой секции имеет три расчетных точки – два центра крепления ГП и козырька к элементам конструкции шагающей крепи, одна точка пересечения (она же точка соединения козырька и ГП) траекторий движения элементов. Основные элементы показаны на кинематической схеме (рисунок 3), где: 1 – окружность вращения козырька; 2 – окружность вращения ГЦ; 3 – окружность вращения ГЦ при

изменении хода поршня; 4 и 5 – начальное и конечное положения точки соединения козырька и ГЦ.

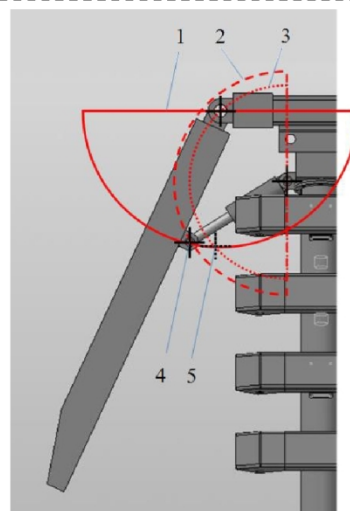


Рис. 3. Кинематическая схема гидропривода козырьков первой секции

Fig. 3. Kinematic scheme of the first frame canopies hydraulic drive

Ход козырька задается изменением положения поршня ГП, допустимые границы движения которого заданы конструкторской документацией. Крепление ГП к козырьку и сам козырек движутся по круговым траекториям, которые могут быть описаны уравнением окружности. Для описания общей траектории движения относительно конструкции модуля необходимо решить систему уравнений двух окружностей, центр одной из которых находится в начале координат.

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = L_{\text{коз.}}^2 \\ (x + x_{\text{опоры гид.пр.}})^2 + (y + y_{\text{опоры гид.пр.}})^2 = L_{\text{гид.пр.}}^2 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $x_{\text{опоры гид.пр.}}$  – положение оси вращения опоры ГП по оси абсцисс,  $y_{\text{опоры гид.пр.}}$  – положение оси вращения опоры ГП по оси ординат,  $L_{\text{коз.}}$  – радиус вращения козырька,  $L_{\text{гид.пр.}}$  – радиус вращения ГП.

Далее вычисляются углы поворота козырька и



Таблица 2. Элементы конечного автомата алгоритма управления шагающей крепью  
 Table 2. Elements of finite machine of walking support control algorithm

Перечень состояний			
Наименование состояния	Об.	Наименование состояния	Об.
Исходное состояние	S <sub>0</sub>	Козырьки секции 2 опущены	S <sub>11</sub>
Козырьки секц. 1 опущены	S <sub>1</sub>	1 и 2 опоры секц. 2 подняты	S <sub>12</sub>
1 и 2 опоры секц. 1 подняты	S <sub>2</sub>	1 и 2 опоры секц. 2 в полож. «передвижка»	S <sub>13</sub>
1 и 2 опоры секц. 1 в полож. «передвижка»	S <sub>3</sub>	3 и 4 опоры секции 2 подняты	S <sub>14</sub>
3 и 4 опоры секции 1 подняты	S <sub>4</sub>	3 и 4 опоры секц. 2 в полож. «передвижка»	S <sub>15</sub>
3 и 4 опоры секц. 1 в полож. «передвижка»	S <sub>5</sub>	«Передвижка» секц. 2	S <sub>16</sub>
«Передвижка» секц. 1	S <sub>6</sub>	3 и 4 опоры секц. 2 в устан. полож.	S <sub>17</sub>
3 и 4 опоры секц. 1 в устан. полож.	S <sub>7</sub>	3 и 4 опоры секц. 2 в полож. «крепь»	S <sub>18</sub>
3 и 4 опоры секц. 1 в полож. «крепь»	S <sub>8</sub>	1 и 2 опоры секц. 2 в устан. полож.	S <sub>29</sub>
1 и 2 опоры секц. 1 в устан. полож.	S <sub>10</sub>	1 и 2 опоры секц. 2 в полож. «крепь»	S <sub>20</sub>
1 и 2 опоры секц. 1 в полож. «крепь»	S <sub>11</sub>	Выпуск угля	S <sub>21</sub>
Перечень сигналов датчиков, управляющих воздействий и команд управления			
Наименование состояния	Обозн.	Тип сигн.	Вид сигнала
Подняты/опущены козырьки (1 и 3 ГП секц. 1)	X <sub>1</sub>	СД	Дискретный
Подняты/опущены козырьки (3 и 4 ГП секц. 2)	X <sub>2</sub>	СД	Дискретный
Устан./снят распор по выс. (ГП 1-2 для секц. 1)	X <sub>3</sub>	СД	Дискретный
Устан./снят распор по выс. (ГП 3-4 для секц. 1)	X <sub>4</sub>	СД	Дискретный
Устан./снят распор по выс. (ГП 1-2 для секц. 2)	X <sub>5</sub>	СД	Дискретный
Устан./снят распор по выс. (ГП 3-4 для секц. 2)	X <sub>6</sub>	СД	Дискретный
Устан./снят распор по шир. (ГП 5-6 для секц. 1)	X <sub>7</sub>	СД	Дискретный
Устан./снят распор по шир. (ГП 7-8 для секц. 1)	X <sub>8</sub>	СД	Дискретный
Устан./снят распор по шир. (ГП 5-6 для секц. 2)	X <sub>9</sub>	СД	Дискретный
Устан./снят распор по шир. (ГП 7-8 для секц. 2)	X <sub>10</sub>	СД	Дискретный
Контроль передвижки секции	X <sub>11</sub>	СД	Дискретный
Поднять/опустить козырьки (1 и 3 ГП секц. 1)	Y <sub>1</sub>	УВ	Дискретный
Поднять/опустить козырьки (2 и 4 ГП секц. 2)	Y <sub>2</sub>	УВ	Дискретный
Устан./снять распор по выс. (ГП 1-2 для секц. 1)	Y <sub>3</sub>	УВ	Дискретный
Устан./снять распор по выс. (ГП 3-4 для секц. 1)	Y <sub>4</sub>	УВ	Дискретный
Устан./снять распор по выс. (ГП 1-2 для секц. 2)	Y <sub>5</sub>	УВ	Дискретный
Устан./снять распор по выс. (ГП 3-4 для секц. 2)	Y <sub>6</sub>	УВ	Дискретный
Устан./снять распор по шир. (ГП 5-6 для секц. 1)	Y <sub>7</sub>	УВ	Дискретный
Устан./снять распор по шир. (ГП 7-8 для секц. 1)	Y <sub>8</sub>	УВ	Дискретный
Устан./снять распор по шир. (ГП 5-6 для секц. 2)	Y <sub>9</sub>	УВ	Дискретный
Устан./снять распор по шир. (ГП 7-8 для секц. 2)	Y <sub>10</sub>	УВ	Дискретный
Передвинуть секцию крепи	Y <sub>11</sub>	УВ	Дискретный
Передвинуть крепь	C <sub>1</sub>	КУ	Дискретный
Управление выделенным ГП	C <sub>2</sub>	КУ	Информационный

ГП на основе теоремы синусов. Угол поворота козырька рассчитывается по треугольнику, образованному точками: центром окружности вращения козырька и начальной и конечной точками 4 и 5 соединения козырька и ГЦ (рис. 2). Угол поворота ГП рассчитывается по треугольнику, образованного точками: центр окружности вращения цилиндра ГП, точка 5 пересечения окружностей траекторий после поворота козырька (рис. 2) и точка проекции центра окружности вращения. Таким образом определена взаимосвязь координат системы объектов – остова крепи, ГП и элемент конструкции.

После вычисления обновленных координат ГП выполняется корректировка положения элементов конструкции шагающей крепи. Корректировка выполняется автоматически за счет структуры

трехмерной модели и заданных связей между ее элементами.

Трехмерная модель шагающей крепи из файла САПР «КОМПАС» интегрирована в среду моделирования MATLAB, обеспечив визуализацию результатов моделирования. Для трехмерной модели сформированы входные и выходные каналы передачи данных о положении элементов конструкции, алгоритм управления шагающего модуля (рис. 4, табл. 2, 3), и алгоритм функционирования его ГП (рис. 5, табл. 2, 3).

Задача моделирования алгоритмов управления заключается в генерации выходных управляющих воздействий (УВ) на исполнительные механизмы на основе совокупности входных данных – команд управления (КУ), сигналов датчиков (СД).

Таблица 3. Элементы конечного автомата алгоритма управления приводом подъема козырька  
 Table 3. Elements of finite machine of canopy actuator control algorithm

Перечень состояний ГП		Перечень входных и выходных сигналов датчиков, управляющих воздействий и команд управления для ГП			
Наим. состояния	Об.	Наименование состояния	Об.	Тип сигн.	Вид сигнала
Козырек поднят	CS	Ход ГЦ	CX	СД	Аналоговый
Сброс давления в ГЦ	CS <sub>2</sub>	Увел-ть/ ум-ть давление в ГЦ	CC	КУ	Дискретный
Козырек опущен	CS <sub>3</sub>				
Повыш. давления в ГЦ	CS <sub>4</sub>				

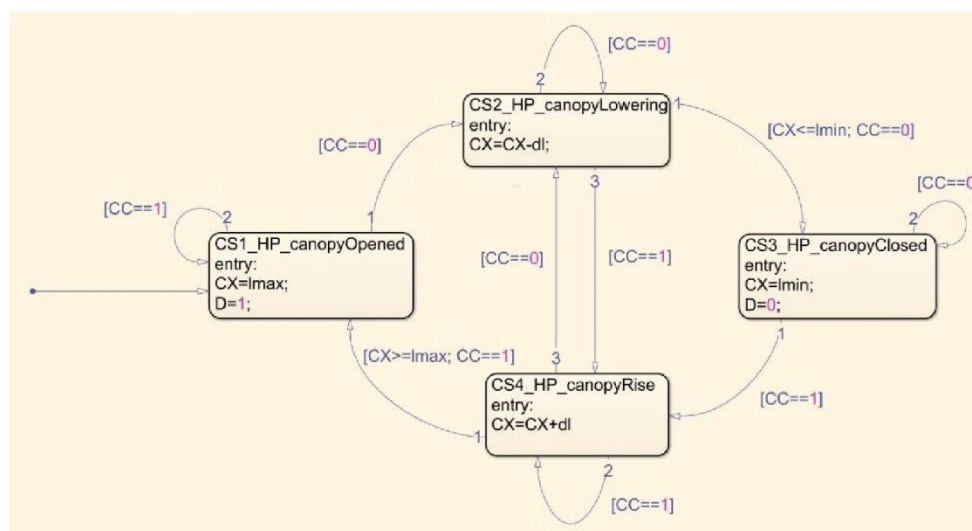


Рис. 4. Блок модели алгоритма функционирования гидропривода  
 Fig. 4. Block of hydraulic drive operation algorithm

Алгоритм функционирования объекта можно описать конечным автоматом (2):

$$FSM = \{S, S_0, A, Y, g, F\}, \quad (2)$$

где  $FSM$  – конечный автомат, описывающий функционирование моделируемого объекта (технологического оборудования, технологического процесса, прикладного программного обеспечения),  $S$  – состояния имитационной модели ТО,  $S_0$  – начальное состояние, формирующееся при запуске имитации,  $A$  – входной алфавит автомата;  $Y$  – выходной алфавит;  $g$  – функция переходов;  $F$  – конечные состояния.

Для реализации функции тестирования необходимо обеспечивать генерацию тестовых наборов сигналов (3).

$$T_i = \{S_i, C_i, \tau_i\}, \quad (3)$$

где  $T_i$  –  $i$ -я тестовая последовательность сигналов;  $S_i$  –  $i$ -е множество состояний сигналов датчиков;  $C_i$  –  $i$ -е множество команд управления;  $\tau_i$  – длительность  $i$ -го состояния;  $i$  – порядковый номер тестового набора данных, в котором  $i = 0 \dots n$ ;  $n$  – количество тестовых наборов данных;  $T_{i=0}$  – набор сигналов, задающий начальное состояние системы,

$T_{i=1 \dots (n-1)}$  – наборы сигналов, приводящие систему к тестовому состоянию,  $T_{i=n}$  – набор сигналов на входе системы, находящейся в тестовом состоянии.

На основе описания процесса функционирования шагающей крепи разработано математическое описание состояний и переходов между ними управляющего алгоритма подземного компьютера, реализующего генерацию управляющих воздействий (табл. 2, 3) для панельных компьютеров ГП модуля.

С использованием созданной модели кинематики реализовано преобразование сгенерированных имитационной моделью данных в пространственные координаты для трехмерной анимации модели шагающей крепи.

Алгоритм функционирования ГП имитируется конечным автоматом, который интерпретирует команды управления от модели программы управления модулем шагающей крепи. На рисунке 4 изображен разработанный конечный автомат для алгоритма управления ГП.

Исходное состояние модели модуля шагающей крепи задано набором СД, УВ и КУ, приведенных в формуле (4). Выходные воздействия соответствуют выдвинутому состоянию для всех ГП модуля.

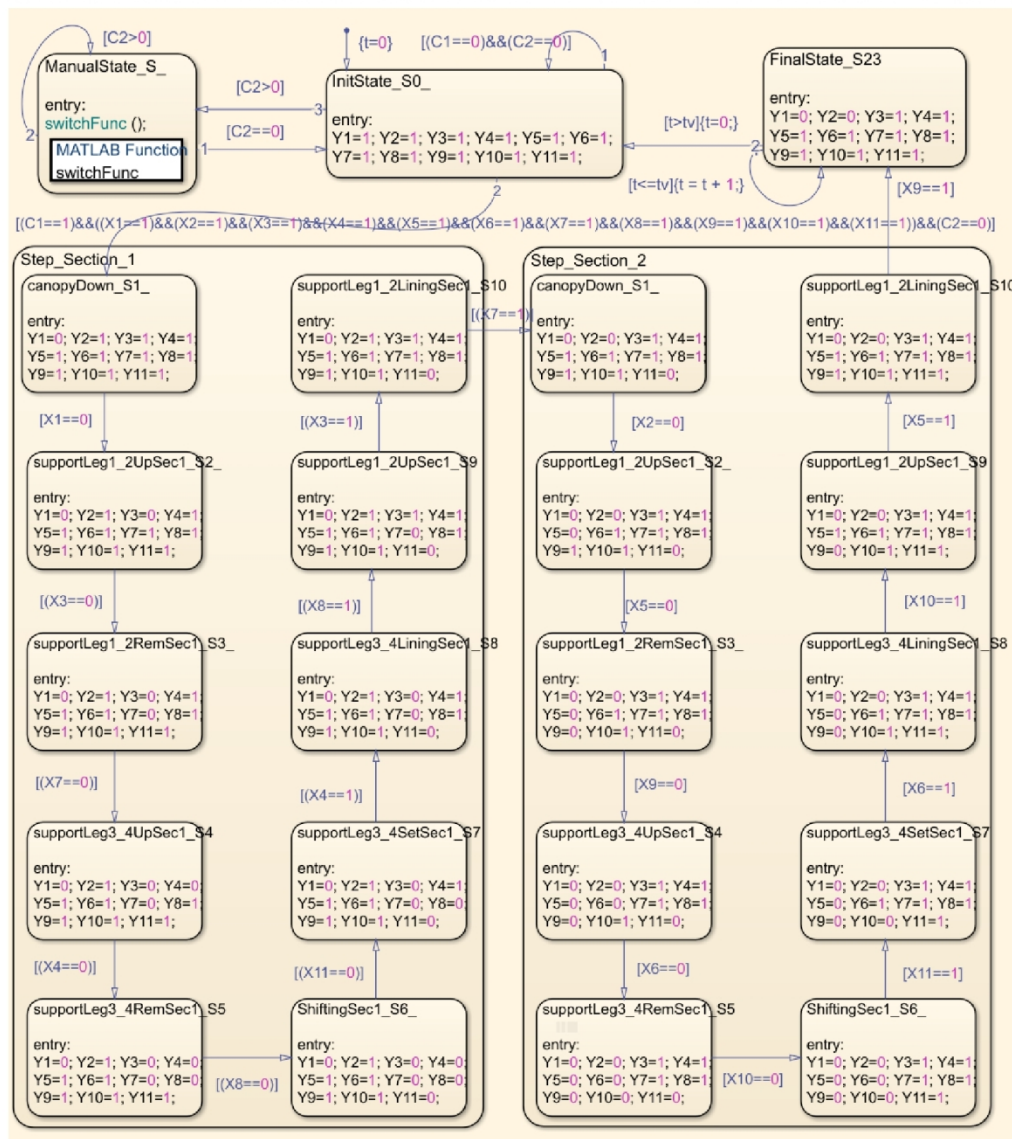


Рис. 5. Блок модели алгоритма программы управления модулем шагающей крепи  
 Fig. 5. Block of walking support module control program model

$$A = X_1 \cap X_2 \cap X_3 \cap X_4 \cap X_5 \cap X_6 \cap X_7 \cap X_8 \cap X_9 \cap X_{10} \cap X_{11} \cap \neg C_1,$$

при  $C_2 = 0$ .

На рисунке 5 приведена схема конечного автомата, разработанного для имитации алгоритма программы управления модулем шагающей крепи.

На рисунке 6 представлена мнемосхема блока модели программы управления АСУ ТП шагающей крепи в MATLAB Simulink. Согласно структуре модели программы управления модулем на входе происходит выбор режима управления. Далее модель осуществляет непосредственное управление блоками модуля: козырьками, опорами секций, передвижкой, ГП горизонтальной и вертикальной стабилизации.

Модель программы управления модулем

предполагает следующие виды управления: (4)

1. Сценарное управление (по программе эксперимента) – автоматическое управление по заданному сценарию.

2. Автоматизированное управление модулем шагающей крепи путем исполнения диспетчерских команд управления рабочими процессами модуля (согласование взаимодействия ГП модуля выполняется моделью программы управления в автоматическом режиме).

3. Ручное управление – управлением оператором, путем запуска команд управления отдельными ГП модуля (каждый шаг работы модуля запускает оператор).

### Заключение

Предложена концепция имитационной модели, обеспечивающая визуальную демонстрацию модуля шагающей крепи для отладки алгоритмов





## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клишин В.И. Экологические аспекты прогрессивных технологий отработки мощных угольных пластов с выпуском подкровельной толщи / В.И. Клишин, С.М. Никитенко, Е.С. Пфаргер // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения : Сборник трудов / ЮТИ ТПУ. 2017. – С. 217–220.
2. Разработка и научное обоснование технологии подэтажной выемки угля и параметров выпускного механизированного комплекса «крепь-штрек» / Л.П. Томашевский, В.П. Левочки, П.А. Боровиков, Ю.С. Блинов, Г.С. Кузин, О.Ф. Калугин / Совершенствование технологии разработки крутых пластов Кузбасса : Сб. научн. тр. №25. – Прокопьевск: КузНИУИ, 1974 г. – С. 55–67.
3. Klishin V. Longwall top coal caving (LTCC) mining technologies with roof softening by hydraulic fracturing method / V. Klishin, S. Nikitenko, G. Opruk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. С. 012015.
4. Клишин В.И. Механизированная отработка мощных крутых пластов под этажами с управляемым выпуском угля / В.И. Клишин, Г.Ю. Опрук, С.В. Клишин // Уголь. 2014. № 11 (1064). – С. 8–11.
5. Stanislaw Gajos. Experience and practical aspects of utilizing a shrinkage method of extraction at “Kazimierz-Juliusz” coal mine in Sosnowiec / International mining forum. New technologies in underground mining. Safety in mines. Cracow-Szczyrk-Wieliczka, Poland 2004. 157–168.
6. Клишин В.И., Опрук Г.Ю. Расчёт газовыделения в очистной забой в системах разработки подэтажными штреками “крепь-штрек”. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 6 (94). С. 54–59.
7. Пат. РФ RU160742U1, МПК Е 21D/00 (2006/01). Крепь для отработки мощных крутых пластов угля подэтажной выемкой / В. И. Клишин, Д. И. Кокоулин. Оpubл. 20.03.2016, бюл. № 8
8. ГОСТ Р 54976-2012 Оборудование горно-шахтное. Термины и определения [текст]. – введ. 2013-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 28 с.
9. Nikitenko M.S., Malakhov Yu.V., Neogi B., Chakraborty P., Banerjee D. Robotic complex for the development of thick steeply-inclined coal seams and ore deposits. IOP conference series: Earth and environmental science. 84 (2017) 012002. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/84/1/012002>
10. Nikitenko M S, Zhuravlev S S, Rudometov S V, Neogi B and Belyi A M. Walking support control system algorithms testing with brain-computer interface (BCI) and augmented reality (AR) technology integration. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 206 (2018) 012043 doi :10.1088/1755-1315/206/1/012043
11. Журавлев С.С., Окольнішников В.В., Рудометов С.В., Шакиров С.Р. Применение подхода «модельно-ориентированного проектирования» к созданию АСУ ТП опасных промышленных объектов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии, 2018. Т. 16, № 4. – С. 56-67. – DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-4-56-67.
12. Арыков С.Б., Судьбин А.А., Шatrov В.А., Рябушкин С.А., Вильданов А.И. Моделирование канала связи командно-измерительной системы космического аппарата // Решетневские чтения, 2015. Т. 2, № 19. – С.: 203–205.
13. Щербина Ю.В. Модельно-ориентированное проектирование системы автоматического управления температурой с циркуляцией промежуточного теплоносителя // Cloud of science, 2015. Т. 2, № 4. – С. 562–576.
14. Jens Holtkötter, Jan Michael, Christian Henke, Ansgar Trächtler, Marcos Bockholt, Andreas Möhlenkamp, Michael Katter. Rapid-Control-Prototyping as part of Model-Based Development of Heat Pump Dryers // Procedia Manufacturing. 4th International Conference on System-Integrated Intelligence: Intelligent, Flexible and Connected Systems in Products and Production, 2018. Vol. 24. – Pp. 235–242.
15. Chung Duc Tran, Rosdiazli Ibrahim, Vijanth Sagayan Asirvadam et al. Internal model control for industrial wireless plant using WirelessHART hardware-in-the-loop simulator // ISA Transactions, 2018. Vol. 75. – Pp. 236–246.

## REFERENCES

1. Klishin V.I, Nikitenko S.M., Pfarger E.S. Ekologicheskie aspekty progressivnykh tekhnologiy otrabotki moschnykh ugolnykh plastov s vipuskom podkrovelnoy tolshi [Ecological aspects of progressive technologies of thick coal seams mining with top coal caving]. Ekologia i bezopasnost' v tekhnosfere: sovremennye problemy i puty resheniya: Sbornik trudov. [Ecology and safety of the technosphere: current problems and solutions: Proceedings]. UTI TPU. 2017. Pp. 217–220.
2. Tomashevsky L.P. et al. Razrabotka i nauchnoe obosnovanie tekhnologii podetazhnoy viemky uglya i parametrov vipusknogo mekhanizirovannogo kompleksa “krep'-shtrek” [Development and scientific

substantiation of the technology of sublevel benching and parameters of the “drift support” mechanized system for top coal caving]. Sovershenstvovanie tekhnologii razrabotki krutikh plastov Kuzbassa: Sbornik nauchn. trud. #25 [Improving the technology of development of steep seams of Kuzbass: Proc. #25] Prokop'evsk: KuzNUI, 1974, Pp. 55–67.

3. Klishin V. Longwall top coal caving (LTCC) mining technologies with roof softening by hydraulic fracturing method / V. Klishin, S. Nikitenko, G. Opruk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. C. 012015.

4. Klishin V.I. Mekhanizirovannaya otrabotka moschnikh krutikh plastov podetazhami s upravlyaemim vypuskom uglya [Mechanized mining of powerful steep seams by sublevel benching with controlled coal release] / V.I. Klishin, G.Yu. Opruk, S.V. Klishin // Ugol' [Coal]. 2014. No. 11 (1064). Pp. 8–11.

5. Stanislaw Gajos. Experience and practical aspects of utilizing a shrinkage metod of extraction at “Kazimierz-Juliusz” coal mine in Sosnowiec. International mining forum. New technologies in underground mining. Safety in mines. Cracow-Szczyrk-Wieliczka, Poland 2004. 157–168

6. Klishin V.I., Opruk G.Yu. Raschet gazovideniya v ochistnoy zaboy v sistemakh razrabotky podetazhnimi shtrekami “krep’-shtreck” [Calculation of gas emission in the working face in the development systems of sublevel drifts “drift support”] // KuzSTU bulletin. 2012. No. 6 (94). Pp. 54–59.

7. Pat. RU160742U1 E 21D/00 (2006/01). Krep' dlya otrabotky krutikh plastov uglya podetazhnoy viemkoy. Klishin V.I., Kokoulin D.I. Publ 20.03.2016, Bul. No. 8

8. GOST R 54976-2012 Oborudovanie gorno-shakhtnoe. [Mining equipment]. – bring into force. 2013-07-01. Moscow: Standartinform, 2014. 28 p.

9. Nikitenko M.S., Malakhov Yu.V., Neogi B., Chakraborty P., Banerjee D. Robotic complex for the development of thick steeply-inclined coal seams and ore deposits. IOP conference series: Earth and environmental science. 84 (2017) 012002. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/84/1/012002>

10. Nikitenko M S, Zhuravlev S S, Rudometov S V, Neogi B and Belyi A M. Walking support control system algorithms testing with brain-computer interface (BCI) and augmented reality (AR) technology integration. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 206 (2018) 012043 doi :10.1088/1755-1315/206/1/012043

11. Zhuravlev S. S., Rudometov S. V., Okolnishnikov V. V., Shakirov S. R. Model-Based Design Approach for Development Process Control Systems of Hazardous Industrial Facilities. Vestnik NSU. Series: Information Technologies, 2018, Vol. 16, No. 4, p. 56–67. DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-4-56-67.

12. Arikov S.B., Sudbin A.A., Shatrov V.A., Ryabushkin S. A., Vildanov A.I. Modeling of the communication channel for command-measuring systems of the spacecraft. Reshetnevs reads, 2015. Vol. 2, No. 19. – Pp. 203–205.

13. Shcherbina Y.V. Model-based design of system of automatic control of the temperature of the circulating intermediate heat transfer. Cloud of science, 2015. Vol. 2, No. 4. – Pp. 562–576.

14. Jens Holtkötter, Jan Michael, Christian Henke, Ansgar Trächtler, Marcos Bockholt, Andreas Möhlenkamp, Michael Katter. Rapid-Control-Prototyping as part of Model-Based Development of Heat Pump Dryers. Procedia Manufacturing. 4-th International Conference on System-Integrated Intelligence: Intelligent, Flexible and Connected Systems in Products and Production, 2018. Vol. 24. – PP. 235–242.

15. Chung Duc Tran, Rosdiazli Ibrahim, Vijanth Sagayan Asirvadam et al. Internal model control for industrial wireless plant using WirelessHART hardware-in-the-loop simulator. ISA Transactions, 2018. Vol. 75. – Pp. 236–246.

Поступило в редакцию 20.03.2019

Received 20 March 2019