

УДК 622.232

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГОРНОЙ ВЫЕМОЧНОЙ МАШИНЫ КАК МЕХАТРОННОГО ОБЪЕКТА

Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В., Степаненко Е.Ю.

Annotation

Developed the structure chart and the mathematical model of working procedure of the mining machine as mechatronic object. Executed the classification of primary stand-alone elements of construction of the mining machine as mechatronic object and developed the mathematical model of them. The developed model can be used for estimate the technical level of the mining machine on designing of it on basis of mechatronic approach.

MINING MACHINE, WORKING PROCEDURE, MECHATRONIC APPROACH, MATHEMATICAL MODEL, STAND-ALONE ELEMENT.

Аннотация

Разработаны структурная схема и математическая модель рабочих процессов горной машины как мехатронного объекта. Выполнена классификация основных функционально-законченных элементов конструкции горной машины как мехатронного объекта и разработаны их математические модели. Разработанная модель может быть использована для оценки показателей технического уровня горной машины при ее проектировании на базе мехатронного подхода.

ГОРНАЯ ВЫЕМОЧНАЯ МАШИНА, РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС, МЕХАТРОННЫЙ ПОДХОД, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЗАКОНЧЕННЫЙ ЭЛЕМЕНТ.

Анотація

Розроблено структурну схему і математичну модель робочих процесів гірничої машини як мехатронного об'єкту. Виконано класифікацію основних функціонально-закінчених елементів конструкції гірничої машини як мехатронного об'єкту і розроблено їх математичні моделі. Розроблена модель може бути використана для оцінки показників технічного рівня гірничої машини при її проектуванні на базі мехатронного підходу.

ГІРНИЧА ВИЙМКОВА МАШИНА, РОБОЧИЙ ПРОЦЕС, МЕХАТРОННИЙ ПІДХІД, ФУНКЦІОНАЛЬНО-ЗАКІНЧЕНИЙ ЕЛЕМЕНТ.

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.

Среди проблем, стоящих перед угольной промышленностью и влияющих на добычу угля в отрасли, наиболее острой остается проблема ускорения темпов проведения подготовительных выработок, обеспечивающих необходимую и своевременную подготовку фронта очистных работ. По нашим оценкам [1], традиционный способ повышения производительности проходческой техники за счет повышения массы и энерговооруженности при неизменных

структурно-компоновочных схемах и способах управления для обеспечения темпов проходки на уровне 40 м/сут требует установки привода исполнительного органа мощностью не менее 1500 кВт при массе комбайна более 200 т. Наиболее весомый фактор, приводящий к завышению установленной мощности привода – неучет системой управления целого ряда особенностей конструкции и процесса функционирования комбайна, что является допустимым при низких темпах проходки, однако неприемлемо в перспективе. Для обеспечения высоких темпов проходки при приемлемых уровнях металлоемкости и энерговооруженности комбайн должен проектироваться как мехатронная система с интеллектуальной системой управления [2].

Анализ исследований и публикаций. Мехатронный подход предполагает проектирование горной машины как единой системы, включающей тесно интегрированные механическую, электрическую, гидравлическую, электронную и информационную составляющие [2, 3]. При этом для оценки эффективности проектируемого комбайна необходимо развитие компьютерных методов анализа рабочих процессов горных машин как мехатронных систем. В соответствии с системным подходом, рабочий процесс горной машины может рассматриваться как совокупность взаимосвязанных рабочих процессов составляющих ее элементов, выделенных конструктивно и функционально – функционально законченных элементов (ФЗЭ) [4]. Для разработки математической модели рабочего процесса мехатронного объекта «горная выемочная машина» требуется разработка математических моделей входящих в ее состав ФЗЭ – мехатронных модулей. Известны разработки [5, 6] в области создания и изучения рабочих процессов отдельных мехатронных узлов и модулей очистных и проходческих комбайнов. Вместе с тем, вопросы систематизации математических моделей отдельных мехатронных ФЗЭ и их объединения в единую математическую модель не рассматривались. При этом ряд математических моделей мехатронных ФЗЭ требуют разработки.

Постановка задачи. Необходима разработка математической модели горной выемочной машины как мехатронного объекта на основе систематизации и разработки математических моделей отдельных мехатронных ФЗЭ.

Изложение материала и результаты.

Горная машина как мехатронный объект представляет собой совокупность взаимосвязанных исполнительных механизмов и базовых корпусных элементов конструкции, изменяющих свое положение в пространстве под действием приводов ее силовых систем в результате компьютерного управления, обеспечивающего реализацию ее функций с максимальной эффективностью. Повышение эффективности работы машины обеспечивается путем адаптивной оптимизации ее рабочего процесса по критериям производительности, энергопотребления и надежности на основе текущей информации о состоянии силовых систем машины, данных о

параметрах внешней среды и состоянии оборудования комплекса [7]. Исходя из этого положения, была разработана (см. рис.1) структурная схема горной машины как мехатронного объекта (ГМ как МО). Для реализации адаптивного интеллектуального управления рабочими процессами и адаптивного технического обслуживания в элементы конструкции машины встраиваются соответствующие датчики, позволяющие получать оперативную информацию об ее состоянии. Основными структурными единицами машины являются:

Пространственно перемещающаяся масса (ППМ) – это базовый корпусной элемент конструкции, который рассматривается как абсолютно жесткое тело, перемещающееся в пространстве и обладающее инерционными свойствами. Состояние ППМ описывается ее координатами и углами поворота в пространстве, скоростями движения, виброускорениями и напряжениями в ее конструкции.

Узел взаимодействия масс – это элемент конструкции машины, реализующий связь ППМ между собой, с внешней средой и с силовым приводом, в котором формируются нагрузки, определяющие пространственное движение ППМ. С учетом особенностей формирования нагрузок узлы взаимодействия масс подразделяются на узлы связи, узлы внутренних возмущений, узлы внешних возмущений, узлы внутренних и внешних возмущений.

Узел связи – это пассивный элемент конструкции машины, обладающий упруго-диссипативными свойствами, обеспечивающий соединение ППМ с целью ограничения их взаимных перемещений. Параметры узла связи не зависят от состояния силового привода. К узлам связи относятся шарниры, упоры, направляющие, амортизаторы и т.д. Состояние узла связи описывается формируемыми в нем нагрузками (реакциями), температурой, виброускорениями, взаимными перемещениями соединяемых ППМ.

Узел внутреннего возмущения – это активный элемент конструкции машины, способный генерировать силовые возмущения и обладающий упруго-диссипативными свойствами. Он связывает ППМ и элементы привода машины, и его параметры зависят от состояния привода. К узлам внутреннего возмущения относятся: гидроцилиндры, гидропатроны, направляющие с гидрозажимами, механические передачи с закреплением ведущего и ведомого элемента на разных ППМ, неуравновешенные вращающиеся и движущиеся массы. Состояние узла внутреннего возмущения описывается теми же величинами, что и для узла связи.

Узел внешнего возмущения – это пассивный элемент конструкции машины, обладающий упруго-диссипативными свойствами, осуществляющий взаимодействие ППМ с внешней средой. К узлам внешних возмущений относятся опорные элементы машин, при этом внешней средой является почва выработки для проходческого комбайна или конвейер для очистного комбайна. Состояние узла внешнего возмущения описывается

формируемыми в нем нагрузками (реакциями), температурой, виброускорениями.

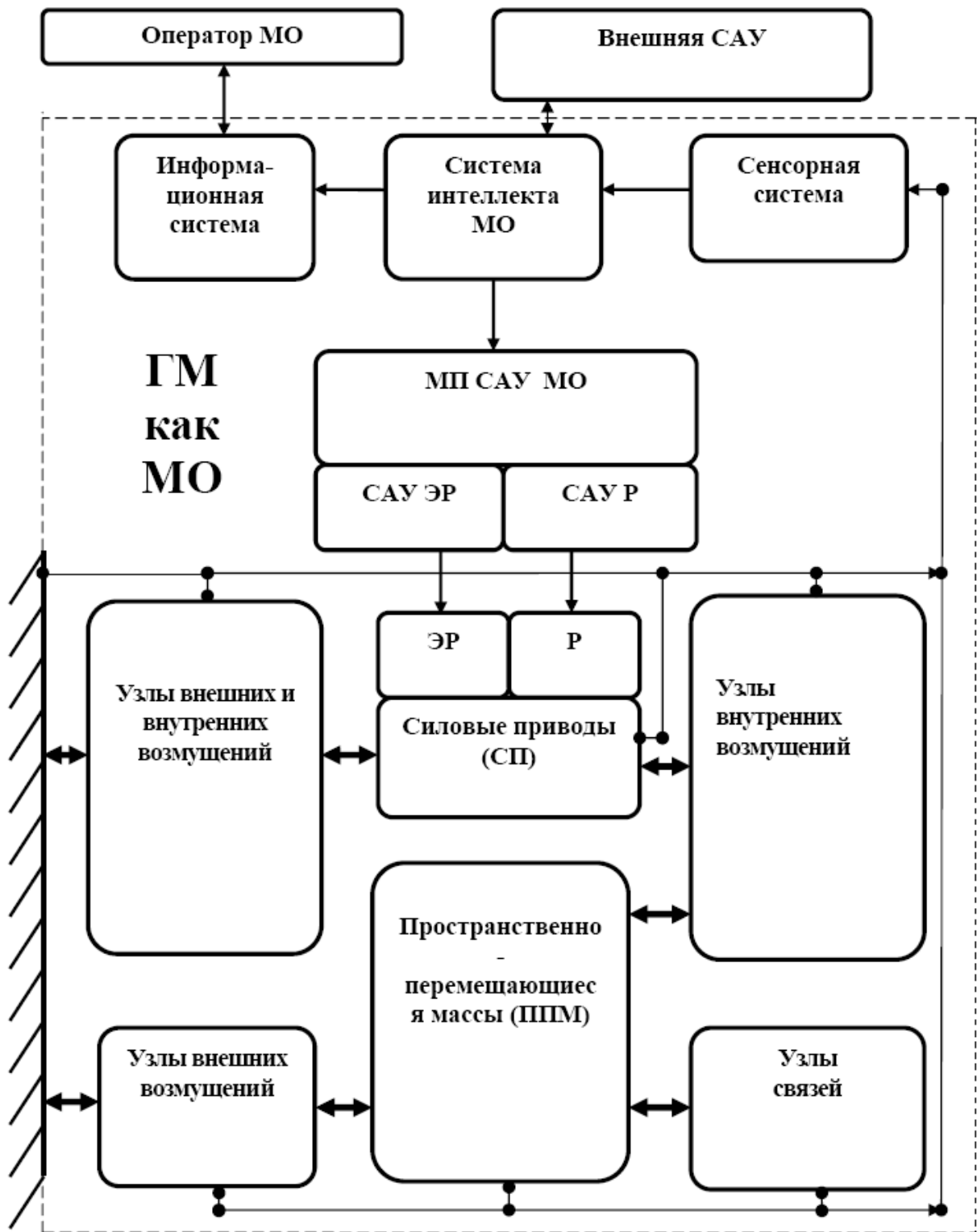


Рис. 1. Структура горной машины как мехатронного объекта (ГМ как МО)

Узел внутреннего и внешнего возмущений – это исполнительный механизм машины, генерирующий силовые возмущения, определяемые закономерностями его взаимодействия с внешней средой. Он связан с ППМ, элементами привода машины и внешней средой. Его параметры зависят от состояния привода и параметров внешней среды. К этим узлам можно отнести, например, движители систем подачи очистных комбайнов, режущий орган горной машины, приводное колесо, гидроопору и т.д. Состояние узла внутреннего и внешнего возмущений описывается формируемыми в нем нагрузками, температурой, виброускорениями, параметрами внешней среды.

Силовой привод (СП) – система, осуществляющая подачу энергии к узлам внутреннего возмущения и узлам внутреннего и внешнего возмущения для функционального перемещения исполнительных механизмов машины. Система привода включает механическую, гидравлическую и электрическую части в различных сочетаниях. Например, для проходческого комбайна система привода резания исполнительного органа электромеханическая (электродвигатель и редуктор), а система привода подачи исполнительного органа гидроэлектромеханическая (электродвигатель, насос и гидрораспределительная аппаратура). Состояние элементов силового привода характеризуется скоростными (угловая скорость, расход жидкости), силовыми (момент, напряжение в металлоконструкциях, давление), электрическими (напряжение, ток, мощность) параметрами, температурой, виброускорениями.

Регулятор силового привода (Р) – элемент силового привода, представляющий механическую, гидравлическую и электрическую части или другие сочетания этих и других частей привода, реализующий под воздействием МП САУ машины изменение регулируемого параметра силового привода. Например, привод изменения эксцентриситета гидронасоса, частотный преобразователь. В соответствии с мехатронным подходом с регулятором силового привода интегрирована микропроцессорная система автоматического управления регулятором силового привода (МП САУ Р), обеспечивающая отработку регулятором силового привода поступающих от МП САУ горной машины команд управления силовым приводом.

Энергораспределитель (ЭР) – элемент силового привода, представляющий механическую, гидравлическую и электрическую части или другие сочетания этих и других частей привода, реализующий под воздействием МП САУ машины включение/выключение подачи энергии к другим элементам силового привода машины, обеспечивая реализацию требуемых технологических операций (гидрораспределитель, муфты переключения передач и т.д.). С энергораспределителем ЭР интегрирована микропроцессорная система автоматического управления энергораспределителем силового привода (МП САУ ЭР). МП САУ ЭР обеспечивает отработку энергораспределителем ЭР поступающих от МП САУ горной машины команд управления силовым приводом,

обеспечивающих реализацию полного цикла работы горной машины с учетом всех технологических операций, для выполнения которых она предназначена.

Система интеллекта горной машины (СИ) – программное обеспечение бортового компьютера для решения задачи многокритериальной оптимизации рабочего цикла горной машины по критериям производительности, энергопотребления и надежности ее работы с учетом ограничивающих факторов, а также прогнозирования отказов элементов на основе текущих данных о параметрах, характеризующих состояние элементов машины и свойства внешней среды, заданий, получаемых от оператора и внешней управляющей системы.

Информационная система предназначена для выдачи информации оператору о состоянии горной машины, прогнозируемых отказах и по обеспечению безопасности эксплуатации машины, а также для ввода заданий от оператора. В информационную систему входят устройства ввода-вывода: дисплеи, индикаторы, устройства сигнализации, управляющие консоли и т.п.

Микропроцессорная система автоматического управления (МП САУ) – электронная система, обеспечивающая функционирование системы интеллекта машины и ее связь с информационной системой и управляемыми устройствами привода (Р, ЭР). Ядром МП САУ является бортовой компьютер машины.

Сенсорная система – совокупность устройств преобразования сигналов датчиков, предназначенная для ввода в бортовой компьютер информации о параметрах, характеризующих состояние элементов мехатронного объекта и свойства внешней среды. Преобразование сигналов предусматривает их усиление, аналого-цифровое преобразование и фильтрацию. Датчики интегрированы в элементы силовых систем машины.

Системное представление машины является основой анализа и синтеза горной машины как мехатронного объекта и позволяет описать рабочий процесс ее функционирования с учетом основных особенностей:

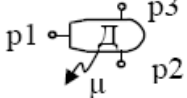
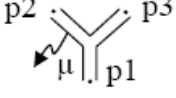
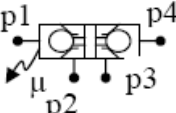
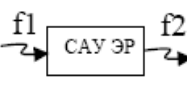
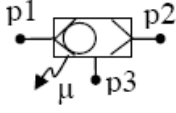
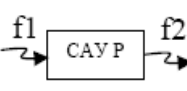
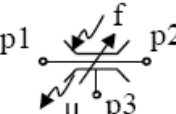
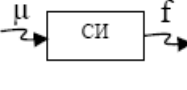
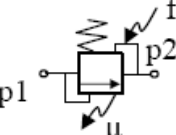
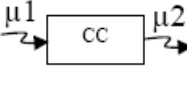
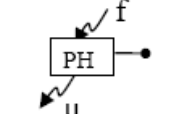
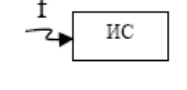
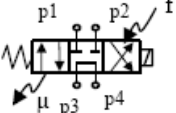
- изменения в пространстве и времени структуры системы “управляемая машина - внешняя среда”;
- многомассовости и пространственности горной машины как объекта исследования и проектирования, а также пространственности перемещения и нагружения ее элементов;
- компьютерного управления, обеспечивающего повышение технического уровня машины на основе автоматизации интеллектуальной деятельности по ее управлению и технической диагностике.

Таблица 1

Основные функционально-законченные элементы конструкции горной машины как мехатронного объекта

Тип		Условное изображение*	Тип	Условное изображение*	
1		2	3	4	
Пространственно перемещающаяся масса (ППМ)			узел внутренних возмущений	гидроцилиндр	
				гидропатрон	
				направляющая с гидрозажимами	
				ЗП в разных корпусах	
узлы взаимодействия			узел внешних возмущений	нерегулируемая опора	
узлы связи	сферический шарнир		узел внутренних и внешних возмущений	режущий орган	
	цилиндрический шарнир			погрузочный орган	
	упор			двигатель СП	
				гидроопоры	
				приводное колесо	
силовой привод					
элементы электропривода			элементы гидропривода		
асинхронный электродвигатель			гидронасос		
преобразователь частоты (регулятор силового привода)			гидромотор		
пускатель (энергораспределитель)			дроссель		
элементы трансмиссии					
маховик			предохранительный клапан		
упругий вал			обратный клапан		
редуктор			трубопровод		

Продолжение табл. 1.

1	2	3	4
дифференциал		тройник	
элементы системы управления		гидрозамок	
система автоматического управления энергораспределителем		клапан «ИЛИ»	
система автоматического управления регулятором силового привода		регулируемый дроссель (регулятор силового привода)	
система интеллекта		регулятор расхода (регулятор силового привода)	
сенсорная система		регулятор рабочего объема насоса (регулятор силового привода)	
информационная система		гидрораспределитель (энергораспределитель)	

* Условные обозначения: f – управляющее воздействие; μ – сигналы с датчиков; t – соединение с ППМ; c – связь с внешней средой; p – соединение с элементами силового привода.

Для формализации рабочего процесса горной машины как МО при составлении математической модели ее функционирования принят принцип представления ГМ как совокупности элементов конструкции (ФЗЭ), входящих в состав системы “МО - внешняя среда” и отражающих структуру и параметры ГМ. Функционирование каждого ФЗЭ описывается частной математической моделью (ММ), при этом совокупность частных ММ и уравнений связи, отражающих взаимодействие элементов в соответствии со структурой ГМ, образует ММ рабочего процесса ГМ как МО. В табл.1 систематизированы основные ФЗЭ конструкции ГМ как МО.

При составлении ММ ППМ примем допущение, что рассматриваемый элемент конструкции является абсолютно жестким телом, на которое действует система сосредоточенных сил, приложенных в узлах взаимодействия с другими ППМ и внешней средой, а также собственный вес.

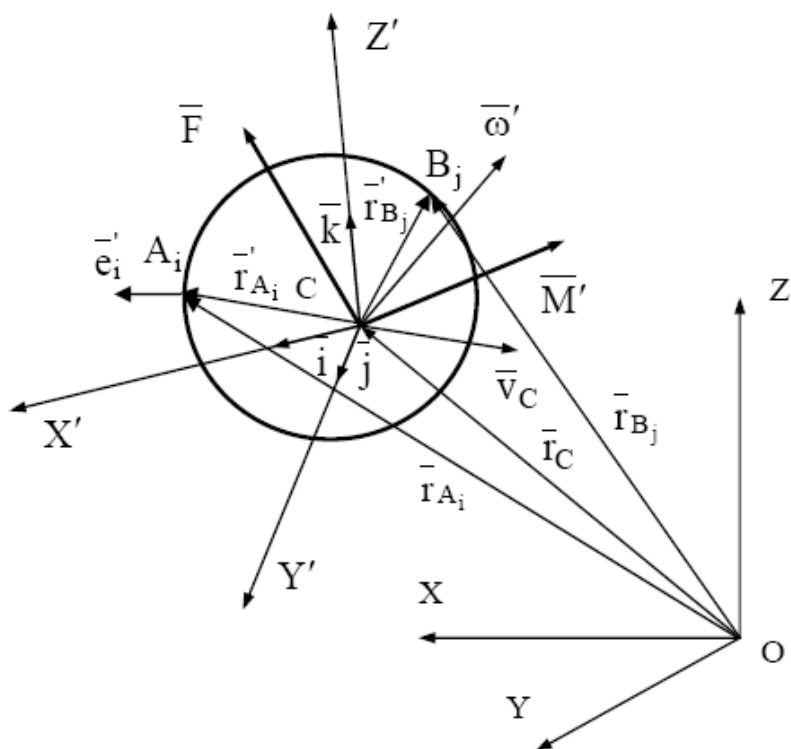


Рис. 2. Расчетная схема ФЗЭ «Пространственно перемещающаяся масса»

На расчетной схеме показаны (см. рис. 2):

$OXYZ$ – неподвижная СК, жестко связанная с забоем;

$CX'YZ'$ – СК, жестко связанная с ППМ, с началом координат в центре масс, оси которой направлены по главным осям инерции;

$\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные векторы направления осей CX', CY' и CZ' в СК $OXYZ$;

$\bar{r}_C \{x_C, y_C, z_C\}$ – радиус-вектор центра масс ППМ в СК $OXYZ$;

$\bar{v}_C \{v_{Cx}, v_{Cy}, v_{Cz}\}$ – скорость центра масс ППМ в СК $OXYZ$;

$\bar{r}_{A_i} \{x'_{A_i}, y'_{A_i}, z'_{A_i}\}$ – радиус-вектор установки i -того датчика измерения вибрации в СК $CX'YZ'$; i – число датчиков измерения вибрации, $i = 1 \dots N_{ВД}$;

$\bar{r}_{A_i} \{x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i}\}$ – радиус-вектор установки i -того датчика измерения вибрации в СК $OXYZ$;

$\bar{r}_{B_j} \{x'_{B_j}, y'_{B_j}, z'_{B_j}\}$ – радиус-вектор установки j -того датчика положения типа GPS навигатора в СК $CX'YZ'$; j – число датчиков типа GPS навигатора, $i = 1 \dots N_{ДП}$;

$\bar{r}_{B_j} \{x_{B_j}, y_{B_j}, z_{B_j}\}$ – радиус-вектор установки j -того датчика положения типа GPS навигатора в СК $OXYZ$;

$\bar{e}'_i \{e'_{ix}, e'_{iy}, e'_{iz}\}$ – вектор виброускорений в точке установки i -того датчика измерения вибрации в СК $CX'YZ'$;

$\bar{\omega}' \{\omega'_{X'}, \omega'_{Y'}, \omega'_{Z'}\}$ – угловая скорость ППМ в СК $CX'YZ'$;

$\bar{F}\{F_X, F_Y, F_Z\}$, $\bar{M}'\{M'_X, M'_Y, M'_Z\}$ - главный вектор и главный момент системы внешних сил, приложенных к ППМ в узлах взаимодействия; центр приведения – центр масс C , главный вектор задан в СК $OXYZ$, главный момент – в СК $CX'YZ'$.

Математическая модель ППМ имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\bar{r}}_C = \frac{\bar{F} + \bar{G}}{m}; \\ \dot{\bar{\omega}}' = \begin{pmatrix} \frac{M'_X - (J_Z - J_Y)\omega'_Y\omega'_Z}{J_X} \\ \frac{M'_Y - (J_X - J_Z)\omega'_Z\omega'_X}{J_Y} \\ \frac{M'_Z - (J_Y - J_X)\omega'_X\omega'_Y}{J_Z} \end{pmatrix}; \\ (\dot{C}') = \begin{pmatrix} i_y\omega'_z - i_z\omega'_y & j_y\omega'_z - j_z\omega'_y & k_y\omega'_z - k_z\omega'_y \\ i_z\omega'_x - i_x\omega'_z & j_z\omega'_x - j_x\omega'_z & k_z\omega'_x - k_x\omega'_z \\ i_x\omega'_y - i_y\omega'_z & j_x\omega'_y - j_y\omega'_x & k_x\omega'_y - k_y\omega'_x \end{pmatrix}; \\ \bar{r}_{Ai} = \bar{r}_C + (C')\bar{r}'_{Ai}; \\ \bar{r}_{Bj} = \bar{r}_C + (C')\bar{r}'_{Bj} + \bar{\Delta}_{ДП}; \\ v_i = e'_i \left[(C')^T \ddot{\bar{r}}_C + (C')^T (\dot{C}') (\bar{\omega}' \times \bar{r}_{Ai}) + \dot{\bar{\omega}}' \times \bar{r}'_{Ai} \right]; \end{array} \right.$$

где m – масса ППМ;

\bar{G} – вес ППМ, заданный в СК $OXYZ$;

J_X, J_Y, J_Z – главные моменты инерции ППМ;

(C') – матрица направляющих косинусов СК $CX'YZ'$ в СК $OXYZ$.

Математическая модель ФЗЭ типа ППМ может быть записана в виде неявной вектор-функции:

$$\bar{f}_{ППМ}(\bar{X}; \bar{P}; \bar{Y}; \bar{\mu}) = 0,$$

где $\bar{X}\{\bar{F}, \bar{M}, \bar{G}\}$ – входной вектор; $\bar{P}\{m, J_X, J_Y, J_Z, \bar{r}'_{Ai}, \bar{e}_i, \bar{P}_{ВДi}, N_{ВД}, \bar{r}'_{Bj}, \bar{P}_{ДПi}, N_{ДП}\}$ – вектор параметров; $\bar{Y}\{\bar{r}_C, \bar{v}_C, \bar{\omega}', (C')\}$ – выходной вектор; $\bar{\mu}\{\bar{v}_i, \bar{r}_{Bj}\}$ – вектор сигналов с интегрированных датчиков состояния ППМ в текущий момент времени.

Аналогично были получены ММ остальных ФЗЭ, приведенных в табл.1. Данные ММ приведены ниже в интегрированном виде.

Математическая модель ФЗЭ типа узел взаимодействия масс запишется как:

$$\bar{f}_j(\bar{Y}_j, \bar{Y}'_j, \bar{C}_{cpj}, \bar{P}_{cpj}; \bar{P}_j; \bar{F}_j, \bar{X}'_j, \bar{\mu}_j) = 0,$$

где \bar{Y}_j - вектор, компонентами которого являются вектора состояний ППМ, контактирующих с j -м узлом взаимодействия масс; \bar{Y}'_j - вектор состояния элементов привода, которые контактируют с j -м узлом взаимодействия масс; \bar{C}_{cpj} - вектор параметров структуры внешней среды в зоне контакта с j -м узлом взаимодействия масс; \bar{P}_{cpj} - вектор параметров внешней среды в зоне контакта с j -м узлом взаимодействия масс; \bar{P}_j - вектор параметров j -го узла взаимодействия масс; \bar{F}_j - вектор нагрузок, формируемых в j -м узле в зонах его контакта с ППМ; \bar{X}'_j - вектор входных параметров для элементов привода, которые контактируют с j -м узлом взаимодействия масс; $\bar{\mu}_j$ - вектор сигналов с интегрированных датчиков состояния j -го узла взаимодействия масс в текущий момент времени.

Математические модели узлов взаимодействия масс запишутся:

- узел связи

$$\bar{f}_j(\bar{Y}_j; \bar{P}_j; \bar{F}_j; \bar{\mu}_j) = 0,$$

- узел внутренних возмущений

$$\bar{f}_j(\bar{Y}_j, \bar{Y}'_j; \bar{P}_j; \bar{F}_j, \bar{X}'_j, \bar{\mu}_j) = 0,$$

- узел внешних возмущений

$$\bar{f}_j(\bar{Y}_j, \bar{Y}'_j, \bar{C}_{cpj}, \bar{P}_{cpj}; \bar{P}_j; \bar{F}_j, \bar{X}'_j, \bar{\mu}_j) = 0,$$

- узел внутренних и внешних возмущений

$$\bar{f}_j(\bar{Y}_j, \bar{Y}'_j, \bar{C}_{cpj}, \bar{P}_{cpj}; \bar{P}_j; \bar{F}_j, \bar{X}'_j, \bar{\mu}_j) = 0, \quad (1)$$

Математическая модель l -го ФЗЭ силового привода как вектор-функция может быть записана:

$$\bar{f}_l(\bar{X}_l, \bar{P}_l, \bar{Y}_l, \bar{\lambda}_l, \bar{\mu}_l) = 0,$$

где \bar{X}_l - входной вектор, отражающий воздействие на l -й ФЗЭ силового привода других связанных с ним ФЗЭ в текущий момент времени; \bar{P}_l - вектор параметров l -го элемента силового привода; \bar{Y}_l - вектор состояния l -го элемента силового привода в текущий момент времени, отражающий его воздействие на другие связанные с ним ФЗЭ; $\bar{\lambda}_l$ - вектор управляющих воздействий на l -й элемент силового привода; $\bar{\mu}_l$ - вектор сигналов с интегрированных датчиков состояния l -го ФЗЭ силового привода в текущий момент времени.

Для регуляторов силового привода и энергораспределителей ММ имеет вид (1), для остальных элементов силового привода:

$$\bar{f}_l(\bar{X}_l, \bar{P}_l, \bar{Y}_l, \bar{\mu}_l) = 0,$$

Математическая модель k -го ФЗЭ системы управления может быть представлена в виде:

$$\bar{Y}_k = \bar{f}_k(\bar{X}_k, \bar{P}_k),$$

где \bar{X}_k - входной вектор k -го ФЗЭ системы управления, компонентами которого в зависимости от типа элемента системы управления могут быть как управляющие воздействия $\bar{\lambda}_k$, так и сигналы с интегрированных датчиков состояния других ФЗЭ $\bar{\mu}_k$ в текущий момент времени; \bar{P}_k - вектор параметров k -го элемента системы управления, характеризующих его конструкцию и алгоритм функционирования; \bar{Y}_k - выходной вектор k -го элемента ФЗЭ системы управления, компонентами которого в зависимости от типа элемента могут быть как управляющие воздействия $\bar{\lambda}_k$, так и результаты обработки сигналов с датчиков состояния других ФЗЭ $\bar{\mu}_k$ в текущий момент времени.

Математическая модель рабочего процесса ГМ как МО запишется в виде совокупности ММ ФЗЭ, входящих в систему “машина - внешняя среда”:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{f}_i(\bar{X}_i; \bar{P}_i; \bar{Y}_i, \bar{\mu}_i) = 0, \quad i = \overline{1, N_i}; \\ \bar{f}_j(\bar{Y}_j, \bar{Y}'_j, \bar{C}_{cpj}, \bar{P}_{cpj}; \bar{P}_j; \bar{F}_j, \bar{X}'_j, \bar{\mu}_j) = 0, \quad j = \overline{1, N_j}; \\ \bar{f}_l(\bar{X}_l, \bar{P}_l, \bar{Y}_l, \bar{\mu}_l) = 0, \quad l = \overline{1, N_l}; \\ \bar{Y}_k = \bar{f}_k(\bar{X}_k, \bar{P}_k), \quad k = \overline{1, N_k}; \\ \{\bar{Y}_{i0}, \bar{Y}_{j0}, \bar{Y}_{l0}, \bar{Y}_{k0}\}; \\ \bar{\Phi}(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \bar{\mu}_i, \bar{Y}_j, \bar{Y}'_j, \bar{F}_j, \bar{X}'_j, \bar{\mu}_j, \bar{X}_l, \bar{Y}_l, \bar{\mu}_l, \bar{X}_k, \bar{Y}_k) = 0, \end{array} \right.$$

где \bar{N}_i - число ФЗЭ типа ППМ; \bar{N}_j - число ФЗЭ типа узел взаимодействия масс; \bar{N}_l - число ФЗЭ трансмиссии; \bar{N}_k - число ФЗЭ системы управления; $\{\bar{Y}_{i0}, \bar{Y}_{j0}, \bar{Y}_{l0}, \bar{Y}_{k0}\}$ - вектор начальных условий - значений выходных параметров ФЗЭ в начальный момент времени; $\bar{\Phi}(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \bar{\mu}_i, \bar{Y}_j, \bar{Y}'_j, \bar{F}_j, \bar{X}'_j, \bar{\mu}_j, \bar{X}_l, \bar{Y}_l, \bar{\mu}_l, \bar{X}_k, \bar{Y}_k) = 0$ - вектор линейных алгебраических уравнений связи, описывающих особенности соединения ФЗЭ в единую систему.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Разработаны структурная схема и математическая модель рабочих процессов горной машины как мехатронного объекта, представляющие собой совокупность разработанных моделей мехатронных функционально-законченных элементов типа пространственно перемещающаяся масса, узлов взаимодействия, элементов силового привода с соответствующими регуляторами и энергораспределителями, а также подсистем интеллекта,

информационной, и сенсорной. Математическая модель описывает установившиеся и переходные режимы функционирования машины с учетом структуры и параметров системы, пространственности, многомассовости машины и технологической схемы ее работы, а также изменений в пространстве и времени структуры этой системы под действием управляющих воздействий на машину.

Разработанная модель может быть использована для оценки таких показателей технического уровня горной машины как теоретическая производительность, ресурс, характеристики нагрузок в элементах конструкции машины, удельная энергоемкость рабочего процесса, а также специфические характеристики: для проходческих комбайнов – темпы проходки и параметры, характеризующие качество проходимой выработки; для очистных комбайнов – сортность угля и т.п. Таким образом, разработанная математическая модель может быть использована при проектировании горных машин на базе мехатронного подхода.

Список литературы:

1. Семенченко А.К., Шабаев О.Е., Семенченко Д.А., Хиценко Н.В. Перспективы развития проходческих комбайнов // Горная техника 2006. Каталог-справочник. – С-Пб: ООО «Славутич». – С. 8-15.
2. Семенченко А.К., Шабаев О.Е., Семенченко Д.А., Хиценко Н.В. Принципы создания проходческих комбайнов как мехатронных систем // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. Випуск 113. - Донецьк, 2006. - С. 238-243.
3. Стадник Н.И., Сергеев А.В., Кондрахин В.П. Мехатроника в угольном машиностроении // Горное оборудование и электротехника. – М.: 2007, - Вып. 4. – С.20-29.
4. Семенченко А.К., Кравченко В.М., Шабаев О.Е. Теоретические основы анализа и синтеза горных машин и процесса их восстановления как динамических систем. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2002. – 302с.
5. Стадник Н.И., Семенченко А.К., Мезников А.В. и др. Экспериментальные исследования тяговых характеристик электрогидрораспределителей // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. Вип. 14(127). – Донецьк, 2007. - С.248-257.
6. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Степаненко Е.Ю., Хиценко Н.В. Оценка эффективности проходческого комбайна с интеллектуальной системой «управление-подача» исполнительного органа. - Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю, №1, 2009. – С. 207-218.
7. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В. Принципы интеллектуализации рабочих процессов мехатронной горной выемочной машины / Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю, №1, 2009. – С. 207-213.