

УДК 622.232

О.Е. Шабаев (канд. техн. наук, доц.)

Н.В. Хиценко (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет

Н.И. Стадник (д-р техн. наук, проф.)

В.А. Мизин (канд. техн. наук)

ГП «Донгипроуглемаш»

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА КАК МЕХАТРОННОГО ОБЪЕКТА

Разработана математическая модель рабочего процесса мехатронного проходческого комбайна стреловидного типа. Модель позволяет осуществлять анализ функционирования комбайна с учетом его структуры и параметров, пространственности, многомассовости и технологической схемы работы, формируемой интеллектуальной системой управления. В результате натурного эксперимента установлена адекватность разработанной математической модели.

проходческий комбайн, рабочий процесс, мехатронный подход, математическая модель, функционально-законченный элемент.

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Важнейшим условием реализации высоких возможностей новой добычной техники является обеспечение необходимого фронта работ, то есть своевременная подготовка очистных забоев. На сегодняшний день основной способ проведения подготовительных выработок – комбайновый. Проблема повышения технического уровня проходческих комбайнов представляется актуальной, ее решение обеспечит повышение конкурентоспособности отечественных горных машин и эффективности горного производства. Для обеспечения высоких темпов проходки при приемлемых уровнях металлоемкости и энерговооруженности комбайн должен проектироваться как мехатронная система с интеллектуальной системой управления [1]. По нашим оценкам, реализация мехатронной конструкции комбайна, обеспечивающей заданный темп проходки, позволит существенно снизить требования к мощности привода исполнительного органа и массе комбайна для всего диапазона применения комбайнов с резовым рабочим инструментом

Анализ исследований и публикаций. Наиболее эффективным инструментом анализа при разработке новых машин является метод математического моделирования. Известны разработки [2, 3] в области создания и изучения рабочих процессов отдельных мехатронных узлов и модулей очистных и проходческих комбайнов с разработкой соответствующих математических моделей (ММ). В работах [4, 5] предложены ММ рабочих процессов проходческих комбайнов с мехатронными модулями, реализующими некоторые частные задачи оптимизации рабочего процесса (например, снижение перебора по контуру

выработки). В работе [6] выполнена систематизация математических моделей рабочих процессов отдельных мехатронных функционально законченных элементов (ФЗЭ) и их объединение в единую математическую модель. Вместе с тем, для проходческого комбайна как мехатронной системы в настоящее время нет ММ, достаточно полно описывающей его рабочий процесс с учетом всех возможных функций, реализуемых интеллектуальной системой управления [7].

Постановка задачи. Необходима разработка и проверка адекватности математической модели рабочего процесса проходческого комбайна как мехатронного объекта с учетом его структуры и параметров, пространственности, многомассовости и технологической схемы работы, формируемой интеллектуальной системой управления.

Изложение материала и результаты.

Разработанное в математическое обеспечение анализа горной выемочной машины как мехатронного объекта [6] позволяет осуществлять автоматизированную компоновку расчетной схемы и математической модели горных выемочных машин различных конструкций. Для апробации и выполнения дальнейших исследований была разработана ММ процесса разрушения забоя мехатронным проходческим комбайном стреловидного типа с аксиальными коронками на базе его структурной схемы, приведенной в работе [5]. Согласно этой схеме в структуре комбайна выделены системы: металлоконструкции, трансмиссии, гидропривода и управления. Первая система (см. рис. 1) включает мехатронные ФЗЭ типа «пространственно перемещающаяся масса»: корпус комбайна М1, турель М2, стрела М3 и редуктор исполнительного органа М4. Кинематика движения указанных ФЗЭ в пространстве характеризуются векторами $\bar{\mu}_{M1} \dots \bar{\mu}_{M4}$ показаний интегрированных датчиков положения типа GPS навигатора (\bar{r}_k) и вибродатчиками (\bar{v}). Эти показания могут быть использованы системой управления для оценки устойчивости комбайна, точности отработки функциональных движений его исполнительного органа, динамичности режимов работы. Корпус М1 базируется на почве выработки на четырех упорах У1..У4 по углам жесткой базы. Турель М2 закреплена на корпусе на цилиндрических шарнирах поворота исполнительного органа Ш1 (верхний) и Ш2 (нижний), ее поворот осуществляется гидроцилиндрами Ц1 (левый) и Ц2 (правый). Стрела М3 закреплена на турели М2 на цилиндрических шарнирах подъема исполнительного органа Ш3 (левый) и Ш4 (правый). На стреле М3 в клиновидных направляющих, которые задаются упорами У5-У8 и гидрозажимами ГЗЖ1 и ГЗЖ2, установлен редуктор исполнительного органа М4. Выдвижение редуктора М4 обеспечивается гидроцилиндрами Ц5 и Ц6. Рабочий процесс гидроцилиндров и гидрозажимов характеризуется векторами $\bar{\mu}_{Ц1} \dots \bar{\mu}_{Ц6}$ и $\bar{\mu}_{ГЗЖ1}, \bar{\mu}_{ГЗЖ2}$ показаний интегрированных датчиков

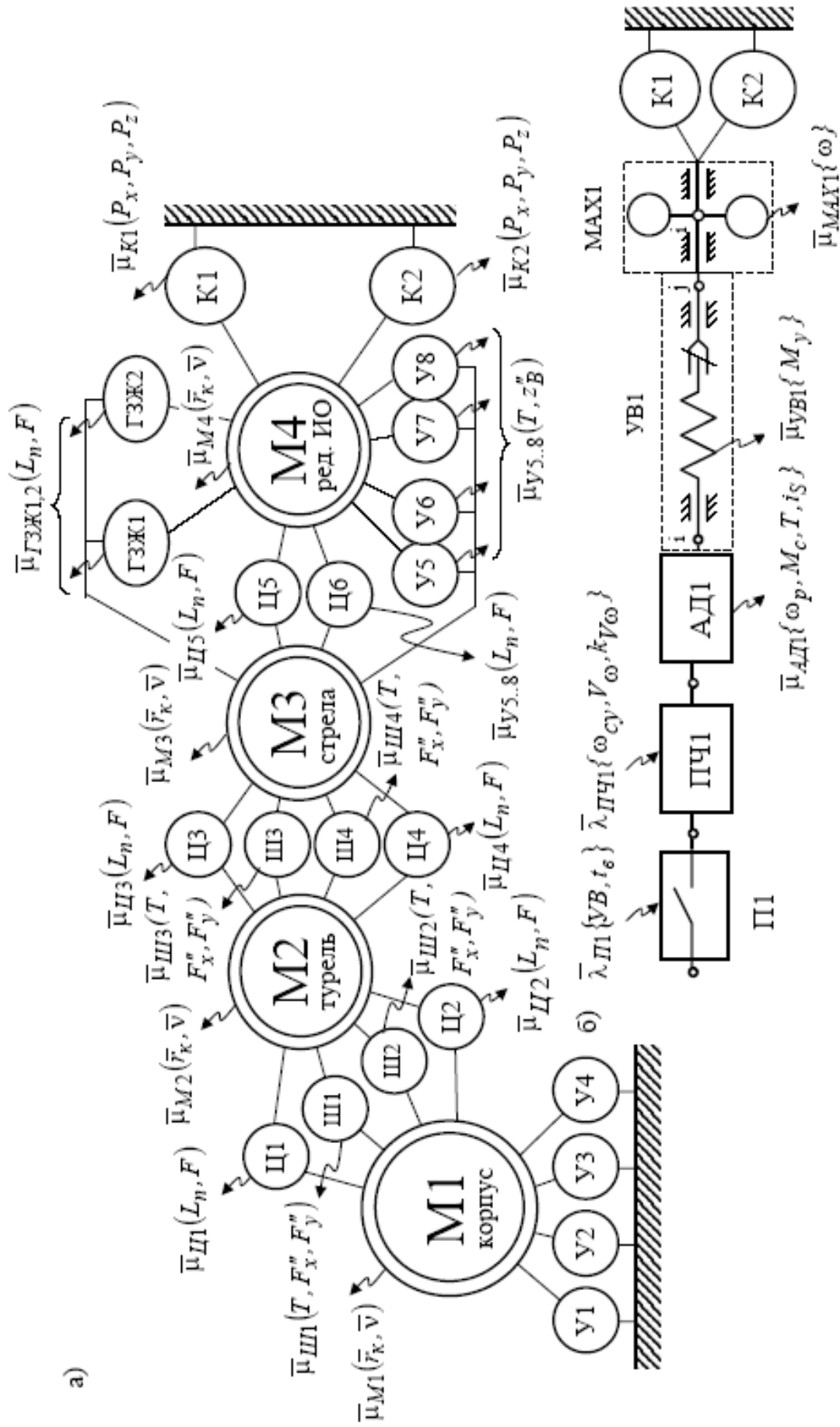


Рис. 1, Лист 1. Структурная схема мехатронного проходческого комбайна:
а - металлоконструкция; б - трансмиссия

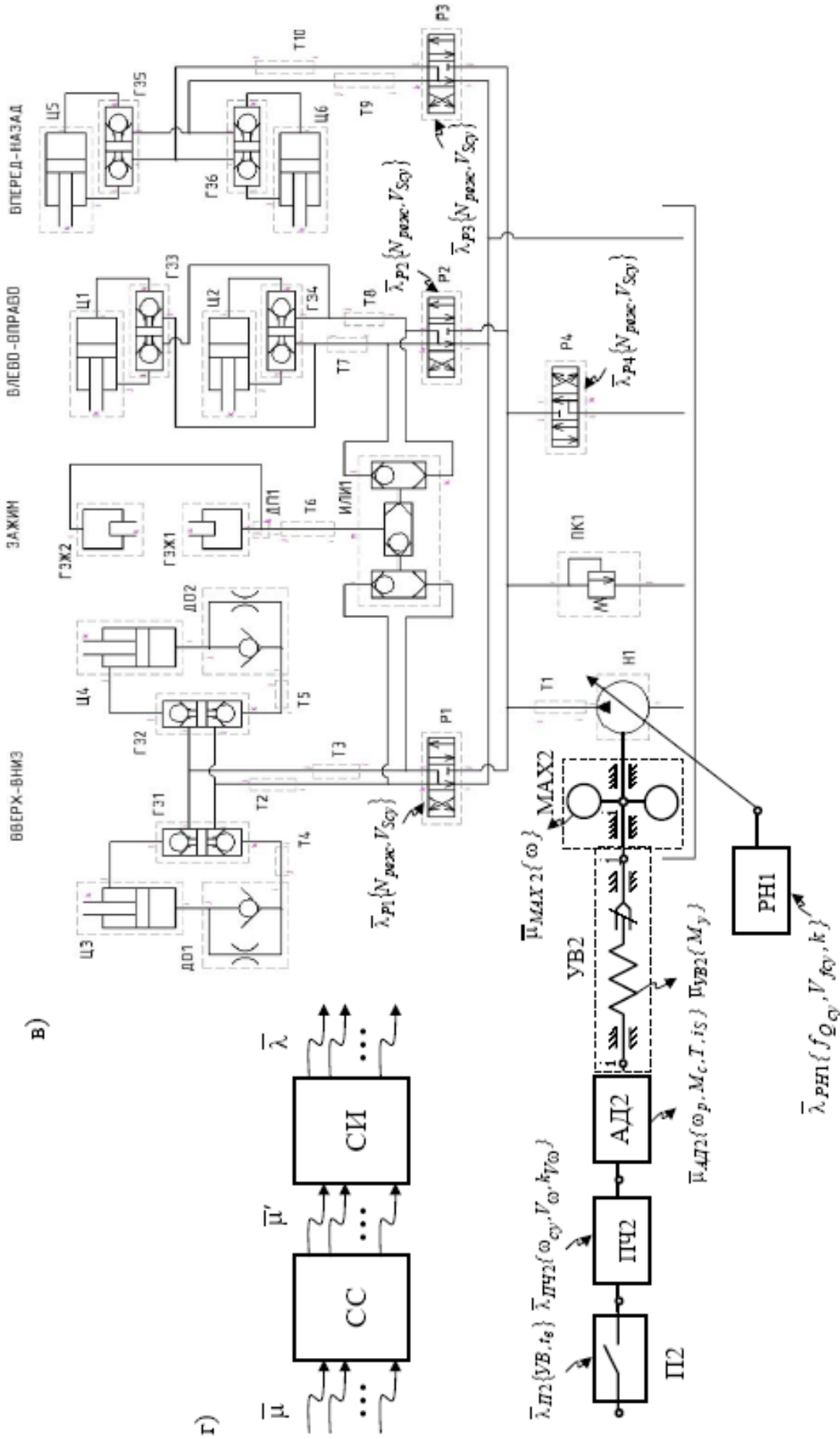


Рис. 1, Лист 2. Структурная схема мехатронного проходческого комбайна:
 В – гидропривод; Г – система управления.

усилия на штоке F , хода поршня L , давления в полостях p_i, p_j . Функционирование цилиндрических шарниров описывается векторами $\bar{\mu}_{III1} \dots \bar{\mu}_{III4}$ показаний интегрированных датчиков температуры T и датчиками усилия на пальце шарнира F_x''', F''' . Эти показания могут быть использованы системой управления для оценки нагруженности системы подвески и взаимных перемещений ФЗЭ типа «пространственно перемещающаяся масса».

На редукторе М4 установлены две аксиальные коронки К1 и К2, нагрузки на режущий инструмент которых P_{xi}, P_{yi}, P_{zi} фиксируются датчиками тензокулаков. Эта информация может быть использована системой управления для оценки эффективности разрушения забоя.

Расчетная схема привода резания исполнительного органа представляет собой совокупность пускателя П1, преобразователя частоты ПЧ1, асинхронного электродвигателя АД1, упругого вала УВ1 и маховика МАХ1, к которому приведены моменты инерции коронок и вращающихся частей редуктора исполнительного органа. Пускатель и преобразователь частоты работают под управлением системы интеллекта, которое задается векторами $\bar{\lambda}_{П1}, \bar{\lambda}_{ПЧ1}$. Рабочий процесс остальных элементов системы привода резания характеризуется описывается векторами $\bar{\mu}_{АД1}, \bar{\mu}_{УВ1}, \bar{\mu}_{МАХ1}$ показаний интегрированных датчиков температуры T , частоты вращения ω_p, ω , момента M_c, M_y и тока двигателя i_S . Эта информация может быть использована системой управления для оценки эффективности разрушения забоя и оценки режима работы двигателя.

Расчетная схема системы привода подачи исполнительного органа включает насос Н1, подача которого задается ФЗЭ «регулятор рабочего объема насоса» РН1 под управлением системы интеллекта. От насоса рабочая жидкость через управляемые системой интеллекта (вектора $\bar{\lambda}_{P1} \dots \bar{\lambda}_{P4}$) распределители Р1-Р4 по трубопроводам Т1-Т10 подается в рабочие полости гидроцилиндров Ц1-Ц6 и гидрозажимов ГЗЖ1 и ГЗЖ2. Также в расчетную схему включены гидрозамки ГЗ1-ГЗ6, предохранительный клапан ПК1, односторонние дроссели ОД1, ОД2, блок клапанов «или» ИЛИ1 и тройник ДП1. Привод насоса осуществляется трансмиссией, включающей пускатель П2, преобразователь частоты ПЧ2, асинхронный электродвигатель АД2, упругий вал УВ2 и маховик МАХ2. В результате регулирования частоты ФЗЭ ПЧ2 достигается второй возможный способ регулирования подачи насоса Н2.

Система управления комбайна включает в себя (в простейшем случае) два блока – ФЗЭ «сенсорная система» и «система интеллекта» [7]. Первый блок осуществляет первичную обработку показаний интегрированных датчиков $\bar{\mu}_1$ с формированием вектора обработанных сигналов $\bar{\mu}_2$. На основании этих данных с учетом заданий оператора $\bar{\lambda}_0$ система интеллекта

вырабатывает вектора управляющих воздействий $\bar{\lambda}$ на энергораспределители (П1, П2, Р1..Р4) и регуляторы силового привода (ПЧ1, ПЧ2, РН1), обеспечивающих выполнение функциональных движений комбайна. Требуемая точность и эффективность этих движений обеспечивается контролем показаний интегрированных в мехатронные ФЗЭ комбайна датчиков.

Сенсорная система обрабатывает показания нескольких датчиков по однотипному алгоритму, который удобно рассмотреть на примере одного датчика. Поступающий от датчика аналоговый сигнал x_i усиливается таким образом, чтобы АЦП обеспечил его оцифровку до предельного значения x_{max} (рис. 2). Точность аналого-цифрового преобразования определяется количеством разрядов n , которое определяет шаг оцифровки Δx .

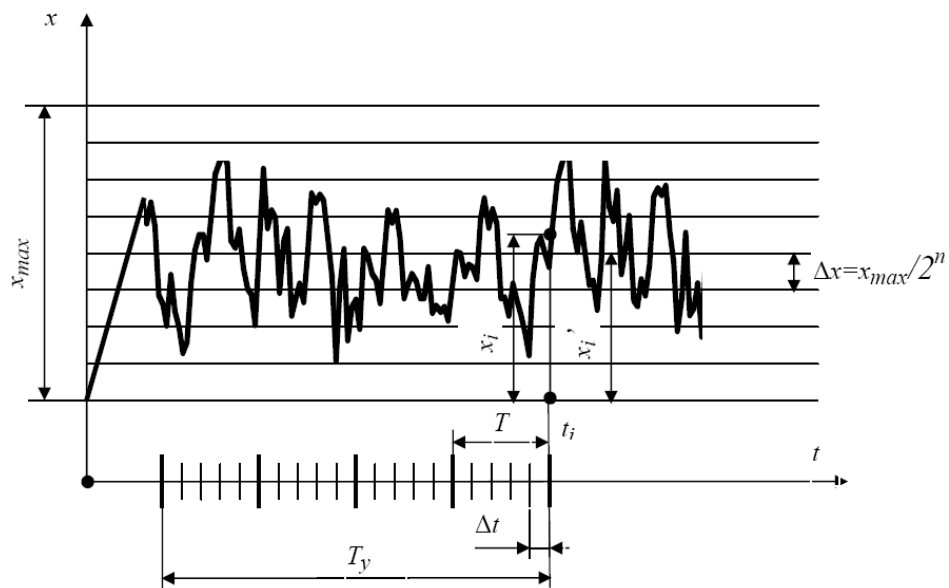


Рис. 2. Принцип обработки показаний датчика

Считывание показаний датчика происходит с шагом по времени T (рис. 2). Считанные значения усредняются за период T_y , для чего производится сохранение n_y последних считанных значений в кольцевом буфере. Математическая модель сенсорной системы может быть представлена в виде (для одного датчика):

$$\left\{ \begin{array}{l} j' = \left\lfloor \frac{i}{n_{cu}} \right\rfloor; \quad j = j' - n_y \left\lfloor \frac{j' - 1}{n_y} \right\rfloor; \quad x'_j = \frac{x_{max}}{2^n} \left\lfloor \frac{2^n \cdot x_i}{x_{max}} \right\rfloor; \\ n_{y\phi} = \begin{cases} j' & \text{при } j' < n_y; \\ n_y & \text{при } j' \geq n_y; \end{cases} \quad Y_i = \begin{cases} \frac{1}{n_{y\phi}} \sum_{l=1}^{n_{y\phi}} x'_l & \text{при } \frac{i}{n_{cu}} = j'; \\ Y_{i-1} & \text{при } \frac{i}{n_{cu}} \neq j'; \end{cases} \end{array} \right.$$

где j' – номер текущего считывания показаний датчика; i – номер шага моделирования; $n_{cu} = \left\lfloor T/\Delta t \right\rfloor$ – количество шагов моделирования Δt ,

которое приходится на шаг считывания T ; j – номер ячейки в кольцевом буфере, в которую записываются показания с датчика; x'_j – оцифрованное значение считанного показания датчика; x_{max} – предел измерения при оцифровке сигнала датчика; n – количество разрядов при оцифровке сигнала датчика; x_i – текущее значение показания датчика; n_y – количество последних значений показаний датчика, хранимое в кольцевом буфере, по которым происходит усреднение сигнала датчика. На начальном этапе работы усреднение происходит по имеющемуся в буфере количеству значений $n_{y\phi} < n_y$; Y_i, Y_{i-1} – обработанные сенсорной системой показания датчика на текущем i и предыдущем $i - 1$ шагах моделирования.

На основе расчетной схемы (рис. 1), разработанных частных ММ ФЗЭ [6, 7] и предложенной ММ сенсорной системы разработана математическая модель процесса разрушения забоя мехатронным проходческим комбайном:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 f_M(\bar{X}_{Mi}, \bar{Y}_{Mi}, \bar{P}_{Mi}, \bar{\mu}_{Mi}) = 0; \quad i = \overline{1,4}; \\
 f_{Ц}(\bar{X}_{Цj1}, \bar{Y}_{Цj1}, \bar{P}_{Цj1}, \bar{\mu}_{Цj1}) = 0; \quad j1 = \overline{1,6}; \\
 f_{ГЗЖ}(\bar{X}_{ГЗЖj2}, \bar{Y}_{ГЗЖj2}, \bar{P}_{ГЗЖj2}, \bar{\mu}_{ГЗЖj2}) = 0; \quad j2 = \overline{1,2}; \\
 f_{Ш}(\bar{X}_{Шj3}, \bar{Y}_{Шj3}, \bar{P}_{Шj3}, \bar{\mu}_{Шj3}) = 0; \quad j3 = \overline{1,4}; \\
 f_{У}(\bar{X}_{Уj4}, \bar{Y}_{Уj4}, \bar{P}_{Уj4}, \bar{\mu}_{Уj4}) = 0; \quad j4 = \overline{1,8}; \\
 \{ \bar{Y}_{Кj5}, \bar{\mu}_{Кj5} \} = f(\bar{X}_{Кj5}, \bar{P}_{Кj5}); \quad j5 = \overline{1,2}; \\
 \bar{Y}_{ПЧ1} = \bar{F}_{ПЧ}(\bar{X}_{ПЧ1}, \bar{P}_{ПЧ1}, \bar{\lambda}_{ПЧ1}); \quad 11 = \overline{1,2}; \\
 f_{АД}(\bar{X}_{АД12}, \bar{Y}_{АД12}, \bar{P}_{АД12}, \bar{\mu}_{АД12}) = 0; \quad 12 = \overline{1,2}; \\
 \{ \bar{Y}_{УВ13}, \bar{\mu}_{УВ13} \} = f_{УВ}(\bar{X}_{УВ13}, \bar{P}_{УВ13}); \quad 13 = \overline{1,2}; \\
 f_{МАХ}(\bar{X}_{МАХ14}, \bar{Y}_{МАХ14}, \bar{P}_{МАХ14}, \bar{\mu}_{МАХ14}) = 0; \quad 14 = \overline{1,2}; \\
 \bar{Y}_{П5} = \bar{F}_{П}(\bar{X}_{П5}, \bar{P}_{П5}, \bar{\lambda}_{П5}); \quad 15 = \overline{1,2}; \\
 \bar{Y}_{Н1} = f_{Н}(\bar{X}_{Н1}, \bar{P}_{Н1}); \\
 f_{ПК}(\bar{X}_{ПК1}, \bar{Y}_{ПК1}, \bar{P}_{ПК1}) = 0; \\
 f_{Т}(\bar{X}_{Т16}, \bar{Y}_{Т16}, \bar{P}_{Т16}) = 0; \quad 16 = \overline{1,10}; \\
 f_{ГЗ}(\bar{X}_{ГЗ17}, \bar{Y}_{ГЗ17}, \bar{P}_{ГЗ17}) = 0; \quad 17 = \overline{1,6}; \\
 f_{Р}(\bar{X}_{Р18}, \bar{Y}_{Р18}, \bar{P}_{Р18}, \bar{\lambda}_{Р18}) = 0; \quad 18 = \overline{1,4}; \\
 f_{ИЛИ}(\bar{X}_{ИЛИ1}, \bar{Y}_{ИЛИ1}, \bar{P}_{ИЛИ1}) = 0;
 \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{aligned}
& f_{ИЛИ}(\bar{X}_{ИЛИ1}, \bar{Y}_{ИЛИ1}, \bar{P}_{ИЛИ1}) = 0; \\
& f_{ДО}(\bar{X}_{ДО19}, \bar{Y}_{ДО19}, \bar{P}_{ДО19}) = 0; \quad l9 = \overline{1,2}; \\
& f_{ДП}(\bar{X}_{ДП1}, \bar{Y}_{ДП1}, \bar{P}_{ДП1}) = 0; \\
& f_{РН}(\bar{X}_{РН1}, \bar{Y}_{РН1}, \bar{P}_{РН1}, \bar{\lambda}_{РН1}) = 0; \\
& \bar{\mu}' = f_{СС}(\bar{\mu}\{\bar{\mu}_{Mi}, \bar{\mu}_{Ц1}, \bar{\mu}_{ГЗЖ}2, \bar{\mu}_{Ш}3, \bar{\mu}_{У}4, \bar{\mu}_{К}5, \bar{\mu}_{АД}2, \bar{\mu}_{УВ}3, \bar{\mu}_{МАХ}4\}, \bar{P}_{СС}); \\
& \bar{\lambda}\{\bar{\lambda}_{ПЧ1}, \bar{\lambda}_{П5}, \bar{\lambda}_{Р18}, \bar{\lambda}_{РН1}\} = f_{СИ}(\bar{\mu}', \bar{P}_{СИ}); \\
& \bar{\varphi}(\bar{X}_{Nm}, \bar{Y}_{Nm}, \bar{P}_{Nm}) = 0,
\end{aligned} \right.$$

где $f_N(\)$ – вектор-функция, задающая математическое описание ФЗЭ N -го типа ($N = "M", "Ц", \dots$); $\bar{X}_{Nm}, \bar{Y}_{Nm}, \bar{P}_{Nm}$ – соответственно векторы входных, выходных величин и вектор параметров для m -го ФЗЭ N -го типа.

Математическая модель содержит 64 взаимоувязанных по входам и выходам частных ММ ФЗЭ 22 типов, из которых 6 – элементы металлоконструкции (пространственно перемещающаяся масса – индекс «М», гидроцилиндр – «Ц», гидрозажим – «ГЗЖ», цилиндрический шарнир – «Ш», упор – «У», аксиальная коронка – «К»); 3 – элементы электропривода (асинхронный электродвигатель – «АД», пускатель – «П», преобразователь частоты – «ПЧ»); 2 – элементы трансмиссии (упругий вал – «УВ», маховик – «МАХ»); 9 – элементы гидропривода (насос – «Н», регулятор рабочего объема насоса – «РН», предохранительный клапан – «ПК», трубопровод – «Т», гидрозамок – «ГЗ», гидрораспределитель – «Р», блок клапанов «или» – «ИЛИ», односторонний дроссель – «ДО», тройник – «ДП»); 2 – элементы системы управления (сенсорная система – «СС», система интеллекта – «СИ»).

Оценка адекватности разработанной математической модели рабочего процесса мехатронного проходческого комбайна осуществлялась на основе сравнения результатов моделирования и результатов натурального эксперимента. Так как в настоящее время нет мехатронных проходческих комбайнов с интеллектуальной системой управления, в качестве объекта экспериментальных исследований принят проходческий комбайн типа КПД с блоком регистрации произошедших событий. Для обеспечения сравнимости результатов, в процессе математического моделирования в систему интеллекта проходческого комбайна был заложен алгоритм управления комбайном, реализующий схему обработки забоя, имеющую место при ручном управлении машиной [8, 9]. Для реализации этого алгоритма в процессе моделирования использовались показания датчиков (см. рис. 1) $\bar{\mu}_{M4}, \bar{\mu}_{Ц1} \dots \bar{\mu}_{Ц6}, \bar{\mu}_{АД1}, \bar{\mu}_{УВ1}$, на основании которых реализовывался определенный алгоритм движения исполнительного органа и управление

электроприводом комбайна путем формирования векторов управляющих воздействий $\bar{\lambda}_{П1}, \bar{\lambda}_{П2}, \bar{\lambda}_{Р1} \dots \bar{\lambda}_{Р4}$.

Исследования нагруженности проходческого комбайна КПД были проведены в условиях конвейерного штрека коренной северной лавы пласта k8 горизонта 450 м участка УПР2 ГОАО «Шахта «Добропольская» ГХК «Добропольеуголь». Основная кровля представлена алевролитом темно-серым, волнисто-слоистый, с прослойками сидерита, средней крепости ($\sigma_{сж} = 30$ МПа), мощностью 7,2 м. В непосредственной кровле залегает аргиллит темно-серый, горизонтально-слоистый, в верхней части слоя с отпечатками углефицированной флоры, тонкоплитчатый, крепостью ($\sigma_{сж} = 27-29$ МПа). Средняя мощность слоя 1,9 м. Угольный пласт k8 сложного строения, состоит из двух пачек, разделенных прослоем углистого сланца (0,01 м). Мощность верхней угольной пачки - 0,50 - 0,55 м, нижней - 0,10-0,15 м. Уголь пласта черный, блестящий, трещиноватый, средней крепости ($\sigma_{сж} = 15$ МПа), полосчатый, по стенкам – пленки кальцита. Общая мощность пласта 0,63 - 0,70 м. В почве пласта - алевролит серый, в верхней части слоя «кучерявчик», слабослюдистый, средней крепости ($\sigma_{сж} = 28-32$ МПа), мощностью 2,0 м. Далее песчаник светло-серый, волнистослоистый, слюдистый, крепкий, в верхней части слоя 0,1 - 0,3 м с остатками корневищ растений и плоскостями притирания, склонный к поддуванию. Средняя крепость $\sigma_{сж} = 76$ МПа. Общая мощность слоя 3,5 м.

Для проведения шахтных исследований была разработана методика, которая предусматривает фиксацию в различных режимах работы комбайна следующих величин (см. рис. 3): мощность электродвигателя исполнительного органа, N_{∂} ; давление распора (давление в гидрозажимах), P_p ; давление в поршневой полости гидроцилиндра вертикальной подачи исполнительного органа, P_{∂} ; давление в штоковой полости гидроцилиндра вертикальной подачи исполнительного органа, P_n ; давление в поршневой полости левого гидроцилиндра горизонтальной подачи исполнительного органа, P_n ; давление в штоковой полости левого гидроцилиндра горизонтальной подачи исполнительного органа, P_n ; усилие в переднем штоке опоры телескопа исполнительного органа, F_n ; усилие в заднем штоке опоры телескопа исполнительного органа, F_3 .

Предусмотренными методикой режимами разрушения забоя комбайном являются:

- по углю: зарубка, разрушение влево, вправо;
- по почве: зарубка, разрушение влево, вправо;
- по кровле: зарубка, разрушение влево, вправо, снизу вверх, сверху

вниз:

- по углю: зарубка, разрушение влево, вправо.

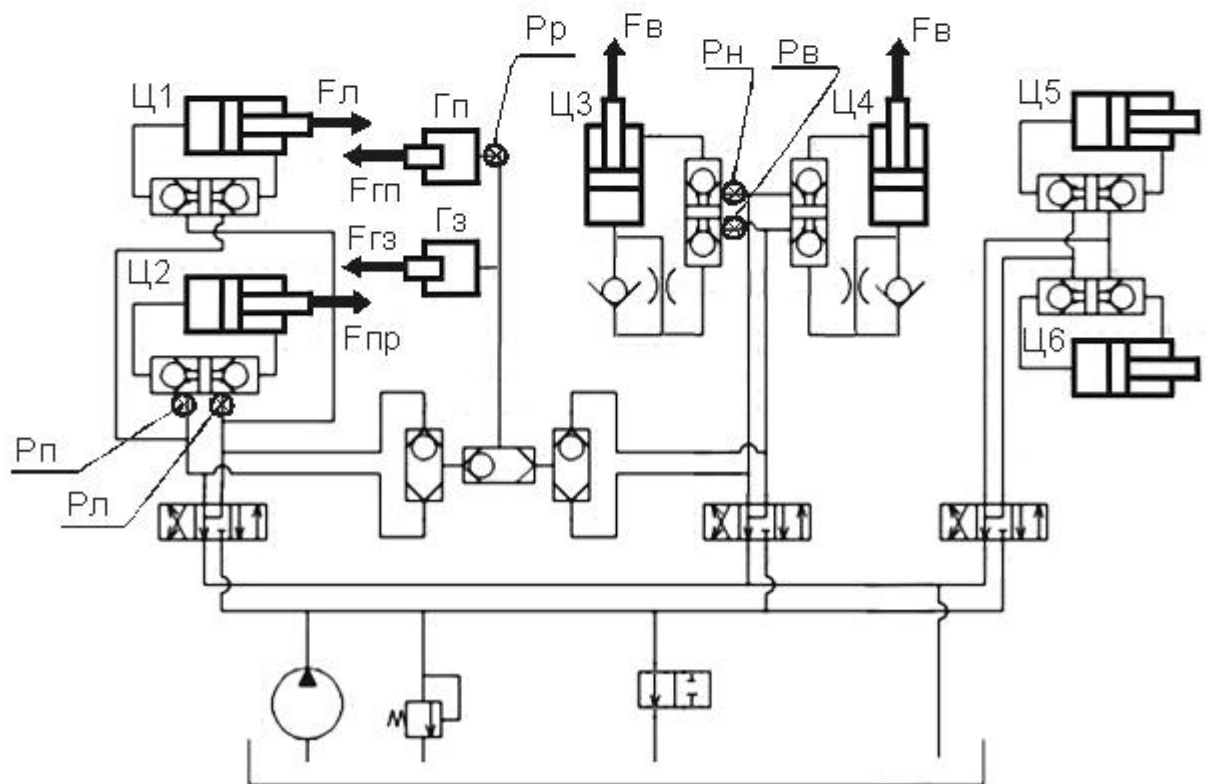
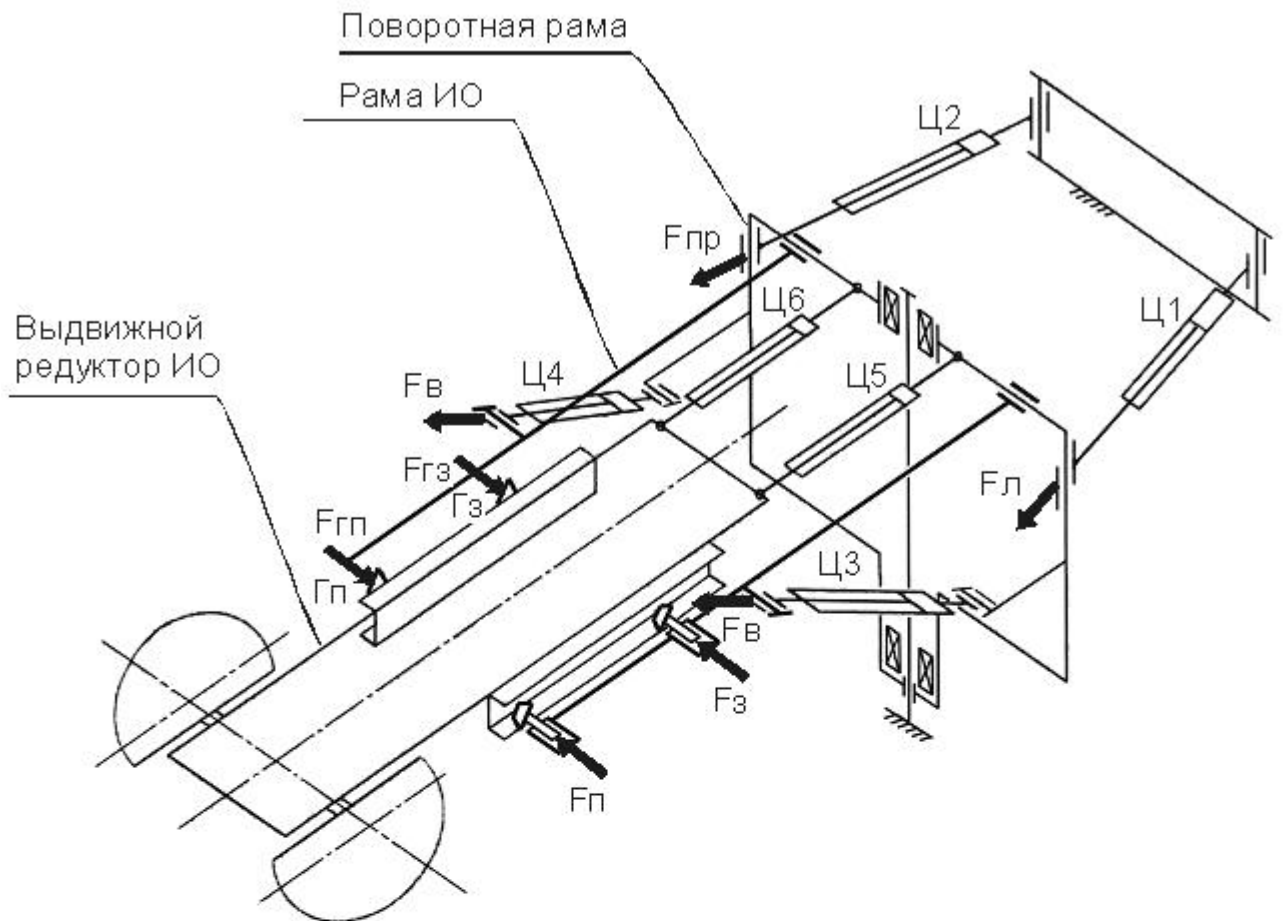


Рис. 3. Схема нагружения и установки датчиков измеряемых величин

План проведения шахтных исследований нагруженности силовых систем комбайна КПД (табл. 1) предусматривал фиксацию, в режимах бокового и вертикального резов и фронтальной зарубки, вышеназванных величин при заданных параметрах стружки исполнительного органа (величины заглубления в массив левой и правой коронок, соответственно – B_l , B_n ; длины бокового реза – L ; величины вертикальной подачи исполнительного органа (ИО) - H).

Трехфазная мощность электродвигателя 2ЭДКОФ(В)250LB4У2.5 исполнительного органа N_∂ измерялась с использованием преобразователя трехфазной мощности П004, который состоит из двух идентичных блоков однофазной мощности, включаемых по схеме двух ваттметров.

Давление в гидроцилиндрах поворота и подъема при различных режимах работы комбайна КПД измерялось при помощи тензоманометров типа ТМ. Тензоманометры включались (см. рис. 3) в поршневую полость гидроцилиндров вертикальной подачи, штоковую полость гидроцилиндров вертикальной подачи, штоковую полость левого гидроцилиндра горизонтальной подачи, поршневую полость левого гидроцилиндра горизонтальной подачи, в гидрозажимы стрелы исполнительного органа.

Усилие в опорах рамы исполнительного органа измерялось на переднем и заднем штоках, при помощи наклеенных проволочных тензорезисторов типа 2ПКБ-10-100А.

Таблица 1

План шахтных исследований нагруженности силовых систем проходческого комбайна КПД

№	Факторы			Фиксируемые величины							
	Режим работы	Параметры режима работы	Разруш.массив	N_∂ , кВт	P_p	P_v	P_n	P_n	P_l	F_3	F_n
					МПа				кН		
1.	БРП	$B_l=0, B_n=0.3\text{м}$ $L=0-L_{\text{мах}}$	У	+	+			+	+	+	+
2.			К	+	+			+	+	+	+
3.			П	+	+			+	+	+	+
4.	БРЛ	$B_l=0.3\text{м}, B_n=0$ $L=0-L_{\text{мах}}$	У	+	+			+	+	+	+
5.			К	+	+			+	+	+	+
6.			П	+	+			+	+	+	+
7.	ВРВ	$B_l = B_n = 0.3\text{м}$ $L = 0$ $H = 0-0.15\text{м}$	У	+	+	+	+			+	+
8.			К	+	+	+	+			+	+
9.			П	+	+	+	+			+	+
10.	ВРН	$B_l = B_n = 0.3\text{м}$ $L = 0$ $H = 0-0.15\text{м}$	У	+	+	+	+			+	+
11.			К	+	+	+	+			+	+
12.			П	+	+	+	+			+	+
13.	ФЗ	$B_l = B_n = 0-0.15\text{м}$ $L = 0$	У	+	+					+	+
14.			К	+	+					+	+
15.			П	+	+					+	+

Для обработки полученных данных была разработана методика, которая предусматривает реализацию следующих этапов:

1. Расшифровка осциллограмм, установка нулевых линий и режимов работы исполнительного органа комбайна.

2. Оцифровка осциллограмм с использованием специально разработанного программного обеспечения для получения значений измеряемых величин в виде дискретных массивов с заданными интервалами квантования.

4. Определение численных значений нагрузок, действующих в силовых системах комбайна.

5. Статистическая обработка как случайных процессов реализаций мощности электродвигателя исполнительного органа (N_{∂}) и усилий (см. рис. 3) в силовых системах:

усилия на переднем штоке – $F_{п}$,

усилия на заднем штоке – $F_{з}$,

усилия распора в переднем гидрозажиме – $F_{гп}$,

усилия распора в заднем гидрозажиме – $F_{гз}$,

усилий от гидроцилиндров вертикальной подачи ИО вверх – $F_{в}$,

усилия от правого гидроцилиндра горизонтальной подачи ИО – $F_{пр}$,

усилия от левого гидроцилиндра горизонтальной подачи ИО – $F_{л}$.

При обработке этих величин рассчитывались оценки математического ожидания и дисперсии, коэффициент вариации и спектральная плотность.

На рис. 4 представлен фрагмент осциллограммы режима вертикальной зарубки исполнительного органа в породе кровли.

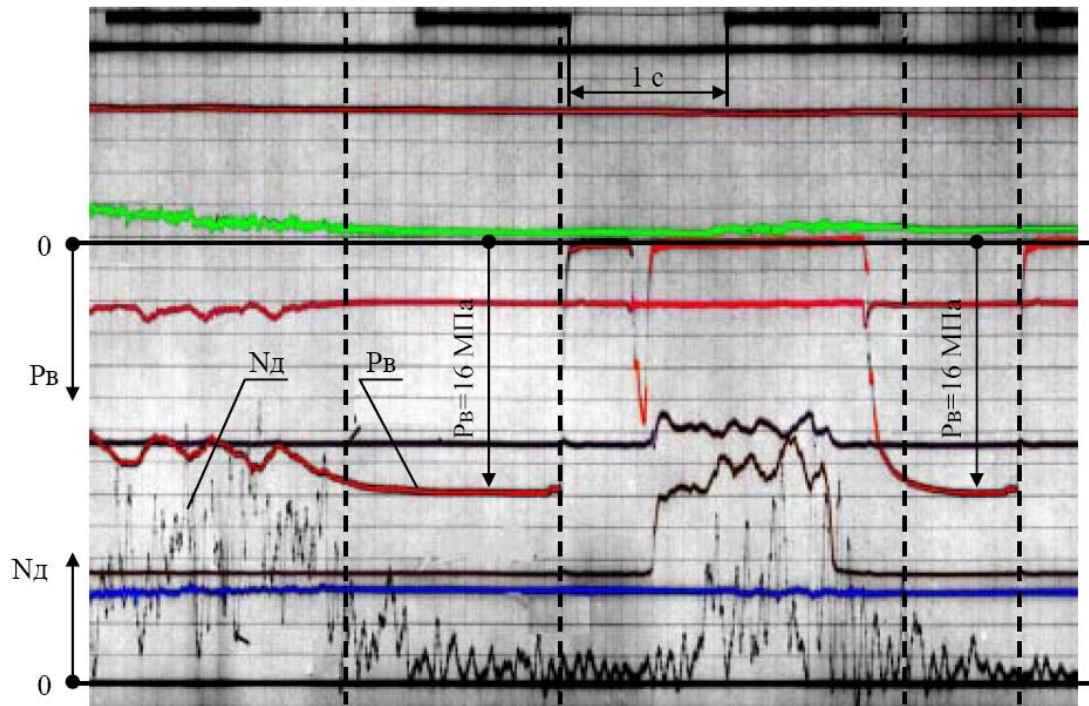


Рис. 4 Фрагмент осциллограммы режима вертикальной зарубки исполнительного органа в породе кровли

Сравнение результатов шахтного эксперимента и моделирования аналогичных режимов разрушения забоя выполнялось по оценкам математических ожиданий, коэффициентов неравномерности и спектральным плотностям мощности приводного двигателя и усилий на гидроцилиндрах подачи исполнительного органа. При этом учитывалось, что ввиду ряда случайных факторов (таких как вариация прочности породы в забое, глубины зарубки и шага фрезерования забоя исполнительным органом) точно воспроизвести условия шахтного эксперимента при моделировании невозможно, поэтому сравнивались режимы работы с близкими значениями мощности, развиваемой приводом исполнительного органа. Характерный пример такого сравнения для режима бокового реза одной коронкой приведен в табл. 2. Отклонения результатов моделирования мощности двигателя привода исполнительного органа N и усилий на правом и левом гидроцилиндрах его поворота $F_{пр}$, $F_{л}$ составляют не более 20 %. Спектральный состав этих нагрузок также совпадает (рис. 5).

Таблица 2

Сравнение результатов шахтного эксперимента и моделирования

	N		F _{пр}		F _л	
	М	К _м	М	К _м	М	К _м
Шахтный эксперимент	131,8	1,54	173,5	1,36	111,2	1,55
Модель	124,1	1,5	204,1	1,27	125,5	1,38
Отклонение, %	-6,1	-2,6	+17,6	-6,6	+12,9	-11,0

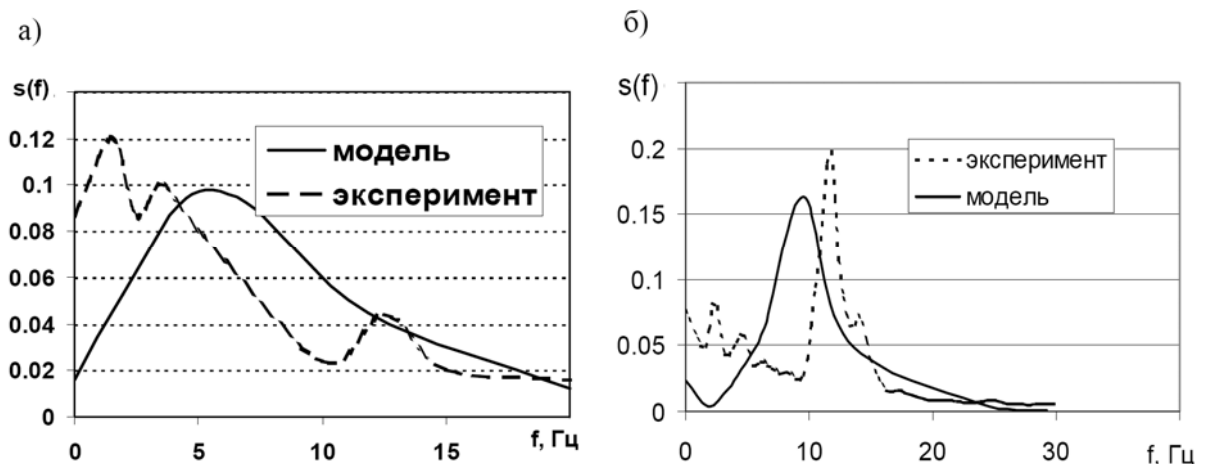


Рис. 5. Нормированные спектральные плотности реакций гидроцилиндров поворота (а) и мощности приводного двигателя (б) в режиме бокового реза в шахтном и модельном экспериментах

Таким образом, разработанная математическая модель рабочего процесса мехатронного проходческого комбайна адекватно описывает процесс разрушения забоя проходческим комбайном. Адекватность математической модели также обеспечена использованием уже апробированных математических моделей ФЗЭ в части описания механических, гидравлических и электрических процессов мехатронных функционально законченных элементов, входящих в модель.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Разработана математическая модель рабочего процесса мехатронного проходческого комбайна стреловидного типа, позволяющая осуществлять анализ его функционирования как системы корпусных элементов, изменяющих свое положение в пространстве под действием приводов силовых систем в результате компьютерного управления. Математическая модель содержит 64 взаимоувязанных по входам и выходам частных ММ ФЗЭ 22 типов, из которых 6 – элементы металлоконструкции (пространственно перемещающаяся масса, гидроцилиндр», гидрозажим, цилиндрический шарнир, упор, аксиальная коронка); 3 – элементы электропривода (асинхронный электродвигатель, пускатель, преобразователь частоты); 2 – элементы трансмиссии (упругий вал, маховик); 9 – элементы гидропривода (насос, регулятор рабочего объема насоса, предохранительный клапан, трубопровод, гидрозамок, гидрораспределитель, блок клапанов «или», односторонний дроссель, тройник); 2 – элементы системы управления (сенсорная система, система интеллекта).

В результате натурального эксперимента, проведенного в условиях конвейерного штрека коренной северной лавы пласта к8 горизонта 450 м участка УПР2 ГОАО «Шахта «Добропольская» ГХК «Добропольеуголь» с регистрацией нагрузок силовых систем комбайна КПД в различных режимах разрушения забоя установлена адекватность разработанной математической модели рабочего процесса мехатронного проходческого комбайна стреловидного типа. Отклонения результатов моделирования мощности двигателя привода исполнительного органа и усилий на штоках гидроцилиндров составляют не более 20 %, спектральный состав этих величин также совпадает.

Библиографический список

1. 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.
2. Стадник Н.И., Сергеев А.В., Мезников А.В., Кондрахин В.П. Проектирование горных машин как мехатронных объектов // Решение научно-технических проблем при создании и внедрении современного горно-шахтного оборудования: Зб. наук. праць. - Донецьк: ГП Донгіпроуглемаш, 2008. - Вип. 113. - С. 133-145.

3. Горбатов П.А., Косарев В.В., Лысенко Н.М. Выемочные комбайны нового поколения как энергетические системы мехатронного класса. – Донецк.: ДонНТУ, 2010. – 176 с.

4. Мехатронная система подачи исполнительного органа проходческого комбайна с интеллектуальным модулем воспроизведения контура выработки. / Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В., Степаненко Е.Ю. // Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: Зб. наук. праць. - Донецьк: ВАТ "НДІГМ ім. М.М. Федорова". – 2008-2009. - Вип. 102-103. - С. 404-414.

5. 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.

6. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В., Степаненко Е.Ю. Математическая модель рабочего процесса горной выемочной машины как мехатронного объекта // Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю, №2, 2010. – С. 253-264.

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, 2010. – С. 68-77.

8. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В. Адаптивная оптимизация цикла обработки и параметров режима разрушения забоя проходческим комбайном избирательного действия по критерию ресурса // Науковий вісник Національного гірничого університету. № 6, 2010. - С. 36-42.

9. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В., Стадник Н.И. Экспериментальные исследования режимов работы исполнительного органа проходческого комбайна // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – №10. – С.49 – 59.

Надійшла до редколегії 1.04.2011

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ПРОХІДНИЦЬКОГО КОМБАЙНА ЯК МЕХАТРОННОГО ОБ'ЄКТУ

О.Є. Шабаєв, М.В. Хіценко, М.І. Стаднік, В.О. Мізін

Розроблено математичну модель робочого процесу мехатронного прохідницького комбайну стрілоподібного типу. Модель дозволяє здійснювати аналіз функціонування комбайна з урахуванням його структури і параметрів, просторовості, багатомасовості і технологічної схеми роботи, що формується інтелектуальною системою управління. У результаті натурного експерименту встановлена адекватність розробленої математичної моделі.

прохідницький комбайн, робочий процес, мехатронний підхід, функціонально-закінчений елемент

SIMULATION OF THE WORKING PROCESS OF THE ROAD-HEADER AS A MECHATRONIC OBJECT

O. Shabaev, N. Khitsenko, N. Stadnik, V. Mizin

It is developed the mathematical model of working process of mechatronic road-header. The model allows the analysis of the operation of the road-header taking into account its structure and parameters, spatiality, multibody and technological scheme of work, forming by the intelligent control system. In the result of the natural experiment established the adequacy of the developed mathematical model.

road-header, working procedure, mechatronic approach, mathematical model, stand-alone element