

УДК 622.232.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА С УЧЕТОМ ЗАЗОРОВ В СИСТЕМЕ ПОДВЕСКИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА

Семенченко А.К., докт. техн. наук, проф., Шабает О.Е., канд.
техн. наук, доц., Семенченко Д.А., канд. техн. наук, вед.н.с.,
Хиценко Н.В., канд. техн. наук, доц., Донецкий
национальный технический университет

Мизин В.А., инж, Донгипроуглемаш

Приведены математические модели гидрозажима и цилиндрического шарнира, позволяющие учесть зазоры в системе подвески исполнительного органа проходческого комбайна

The mathematical models of hydraulic unclasp and pin hinge is given. This models allow to take into account gaps in hinge system of acting unit of road-header

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Задача повышения технического уровня проходческих комбайнов (ПК) является актуальной, ее решение обеспечит повышение конкурентоспособности отечественных горных машин и темпов проходки. Одним из наиболее эффективных методов исследования рабочих процессов этих машин является имитационное математическое моделирование. Развитие математических моделей (ММ) функционирования ПК позволит на стадии проектирования обосновывать их рациональные параметры.

Анализ исследований и публикаций. Математическое моделирование функционирования сложных энергомеханических систем, к которым относятся ПК, может быть наиболее эффективно реализовано на основе системного представления о ПК как о совокупности взаимосвязанных функционально законченных элементов (ФЗЭ), каждый из которых описывается частной ММ [1]. Ранее использовавшиеся ММ [2, 3] описывали систему подвески ИО ПК как конструкцию без зазоров. Это может привести к погрешностям моделирования нагрузок в системе подвески вследствие неучета ударных нагрузок, вызванных перекладкой зазоров. Для того, чтобы учесть зазоры в системе подвески ИО, стрелу ПК следует рассматривать как две пространственно перемещающиеся массы (ППМ) – раму ИО и вы-

двигавшийся в направляющих редуктор ИО, а также ввести зазоры в цилиндрические шарниры системы подвески. Для выборки зазора в направляющих преду-

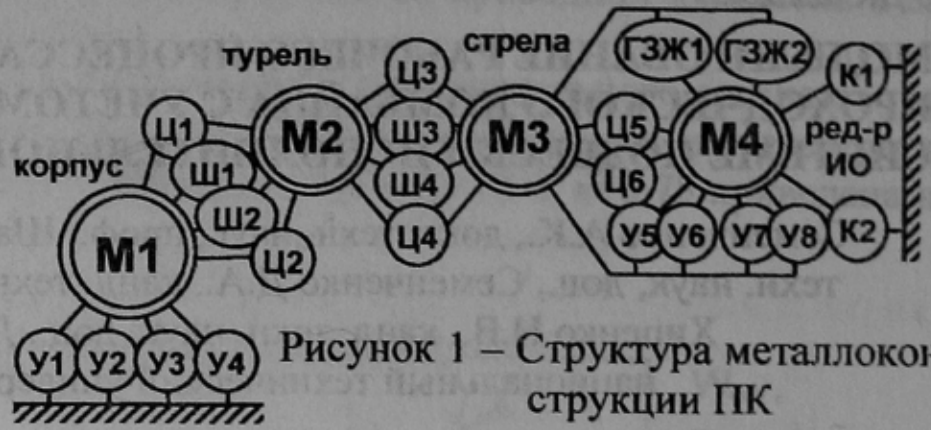


Рисунок 1 – Структура металлоконструкции ПК

смотрены гидро-зажимы, в которые подается рабочая жидкость из напорной линии гидросистемы. Таким образом, необходимо задать структуру металлоконструкций ПК (рис. 1), отличающуюся от известной [2] наличием ФЗЭ типа «гидрозажим» ГЗЖ1,2 и «упор» У5-8, задающих направляющие, «ППМ» М4 (редуктор ИО) и «гидроцилиндр» Ц5,6 (реализуют выдвижение редуктора). Данная задача потребовала разработки частных ММ некоторых ФЗЭ.

Постановка задачи. Цель исследования – разработать ММ ФЗЭ, позволяющих учесть зазоры в системе подвески ИО ПК. Задачи исследования:

- разработка расчетной схемы и ММ ФЗЭ «гидрозажим»;
- разработка расчетной схемы и ММ ФЗЭ «цилиндрический шарнир», учитывающей наличие зазоров.

Изложение материала и результаты. Гидрозажим как ФЗЭ реализует связь двух ППМ через гидропатрон, стакан которого жестко закреплен к ППМ 1, а шток взаимодействует с клиновидной направляющей, жестко закрепленной на ППМ 2 (см. рис. 2). При отсутствии давления шток гидропатрона свободно перемещается в стакане и вдоль направляющей. Подача жидкости в гидропатрон приводит к выборке зазора и зажиму ППМ 2. На рис. 2 показаны: $DX_j^m Y_j^m Z_j^m$ - системы координат (СК), задающие направляющие плоскости ($j=1,2$), оси DX_j^m которых лежат на линии их пересечения а ось DZ_j^m направлена по наружной нормали к j -й направляющей плоскости; \bar{e}' - единичный вектор в направлении выдвижения штока; \bar{r}'_A, \bar{r}''_D - радиус-векторы точек A и D в СК, жестко связанных соответственно с ППМ 1 и 2; s – смещение штока; h_B, h_{max} – конструктивные размеры.

При разработке ММ были приняты следующие допущения:

1. Перемещением штока s при определении точек приложения реакции в гидрозажиме можно пренебречь, так как s мало по сравне-

нию с остальными линейными размерами.

2. Составляющими силы трения в зажиме, направленными не вдоль оси направляющей, можно пренебречь, так как фиксация ППМ 2 в этом направлении осуществляется в основном нормальными реакциями к направляющим поверхностям.

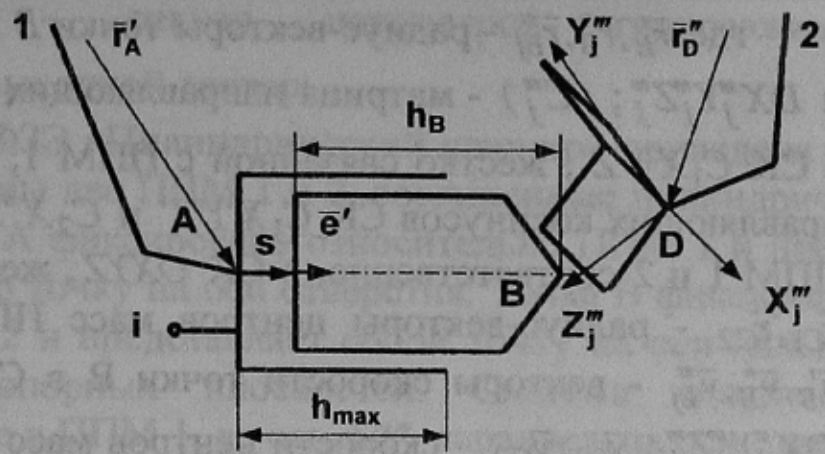


Рисунок 2 – Расчетная схема ФЗЭ «Гидрозажим»

Математическая модель ФЗЭ «гидрозажим» имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & \bar{r}'_B = \bar{r}'_A + \bar{e}'(s + h_a); \quad \bar{r}''_B = (C'')^T [(C')\bar{r}'_B + \bar{r}_{C1} - \bar{r}_{C2}]; \\ & \bar{r}''_{Bj} = (C''_j)^T (\bar{r}''_B - \bar{r}''_D); \quad \bar{v}''_B = (C'')^T [\bar{v}_{C1} + (C')(\bar{\omega}'_1 \times \bar{r}'_B + \bar{e}'\dot{s})]; \\ & \bar{v}''_{Bj} = (C''_j)^T \bar{v}''_B; \quad \bar{v}''_{BII} = \bar{\omega}''_2 \times \bar{r}''_B + (C'')^T \bar{v}_{C2}; \\ & \bar{v}''_{BIIj} = (C''_j)^T \bar{v}''_{BII}; \quad \bar{v}''_{BOj} = \bar{v}''_{Bj} - \bar{v}''_{BIIj}; \\ & R_j = \begin{cases} 0 & \text{при } z''_{Bj} \geq 0; \\ cz''_{Bj} + \beta v''_{BOZj} & \text{при } z''_{Bj} < 0; \end{cases} \quad \bar{F}''_{Bj} = \begin{cases} -R_j f_n \text{sign} v''_{BOXj} \\ 0 \\ R_j \end{cases}; \\ & \bar{F}_2 = (C'')\bar{F}''_2; \quad \bar{F}''_2 = \sum_{j=1}^2 (C''_j)\bar{F}''_{Bj}; \quad \bar{M}''_2 = \bar{r}''_B \times \bar{F}''_2; \quad \bar{F}_1 = -\bar{F}_2; \\ & \bar{F}'_1 = (C')^T \bar{F}_1; \quad \bar{M}'_1 = \bar{r}'_B \times \bar{F}'_1; \quad F_o = \bar{e}' \cdot \bar{F}'_1; \quad F_p = \sqrt{|\bar{F}'_1|^2 - F_o^2}; \\ & F_{mp} = f_n F_p \left(\frac{2h_B}{h_{max} - s} - 1 \right) + F_{mp0}; \\ & F_{\delta s} = \begin{cases} p_i F + F_o - s c_c & \text{при } s < 0; \\ p_i F + F_o & \text{при } s \geq 0; \end{cases} \\ & \text{Если } \dot{s} = 0 \text{ и } |F_{\delta s}| < F_{mp}, \text{ то } \ddot{s} = 0; \\ & \quad \text{иначе } \ddot{s} = (F_{\delta s} - h\dot{s} - F_{mp} \text{sign}(\dot{s})) / m; \\ & \dot{p}_i = \frac{-(Q_i + F\dot{s})E_{np}}{\Delta V + sF}; \end{aligned} \right.$$

где $\bar{r}'_B, \bar{r}''_B, \bar{r}'''_{Bj}$ - радиус-векторы точки B в СК $C_1X'Y'Z'$, $C_2X''Y''Z''$ и $DX'''_jY'''_jZ'''_j$; (C'''_j) - матрица направляющих косинусов СК $DX'''_jY'''_jZ'''_j$ в СК $C_1X'Y'Z'$, жестко связанной с ППМ 1; (C') , (C'') - матрицы направляющих косинусов СК $C_1X'Y'Z'$ и $C_2X''Y''Z''$, жестко связанных с ППМ 1 и 2 соответственно, в СК $OXYZ$, жестко связанной с забоем; $\bar{r}_{C1}, \bar{r}_{C2}$ - радиус-векторы центров масс ППМ 1 и 2 в СК $OXYZ$; $\bar{v}'_B, \bar{v}''_B, \bar{v}'''_{Bj}$ - векторы скорости точки B в СК $C_1X'Y'Z'$, $C_2X''Y''Z''$ и $DX'''_jY'''_jZ'''_j$; $\bar{v}_{C1}, \bar{v}_{C2}$ - скорости центров масс ППМ 1 и 2 в СК $OXYZ$; $\bar{\omega}'_1, \bar{\omega}'_2$ - угловые скорости ППМ 1 и 2 в СК $C_1X'Y'Z'$ и $C_2X''Y''Z''$ соответственно; $\bar{v}'''_{BOj}, v'''_{BOXj}, v'''_{BOZj}$ - вектор скорости точки B относительно j -той направляющей плоскости в СК $DX'''_jY'''_jZ'''_j$ и его проекции на оси DX'''_j и DZ'''_j ; R_j - реакция на поверхности контакта штока с j -той направляющей; c, β - жесткость и коэффициент демпфирования сопряжения направляющей и штока; \bar{F}'''_{Bj} - суммарная реакция в точке B штока со стороны j -той направляющей плоскости в СК $DX'''_jY'''_jZ'''_j$; f_n, f_n - коэффициенты трения в парах «шток-направляющая» и «шток-стакан» соответственно; F_o, F_p - осевая и поперечная составляющие вектора силы, приложенного к штоку; F_{mp}, F_{dv} - суммарные трения и движущая силы, приложенные к штоку вдоль его оси; F_{mp0} - постоянная силы трения в паре «шток-стакан»; p_i, Q_i - давление и расход жидкости в точке i подключения гидропатрона; c_c - жесткость сдвинутого гидропатрона; $F, \Delta V$ - активная площадь и «мертвый» объем гидропатрона; m - масса штока; E_{np} - приведенный объемный модуль упругости полости с жидкостью; \bar{F}_1, \bar{F}_2 - реакции в гидрозажиме, приложенные к ППМ 1 и 2 в СК $OXYZ$; \bar{r}'_B - радиус-вектор точки B в СК $C_1X'Y'Z'$; \bar{M}'_1, \bar{M}''_2 - моменты реакций в гидрозажиме относительно точек C_1 и C_2 , приложенные к ППМ 1 и 2 в СК $C_1X'Y'Z'$ и $C_2X''Y''Z''$ соответственно.

Математическая модель гидрозажима как ФЗЭ:

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

где $\bar{X}\{\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, Q_i\}$ - входной вектор, в котором \bar{Y}_1, \bar{Y}_2 - векторы состояния первой и второй ППМ; $\bar{P}\{r'_A, r''_D, (C'''_j), c, \beta, h_B, h_{max}, f_n, f_n,$

$F_{mp0}, c_c, F, m, \Delta V, E_{np}$ } - вектор параметров гидрозажима;
 $\bar{Y} \{ \bar{F}_1, \bar{M}_1, \bar{F}_2, \bar{M}_2, p_i \}$ - выходной вектор.

Расчетная схема ФЗЭ «Цилиндрический шарнир» приведена на рис. 3. На схеме показаны две ППМ 1 и 2, соединенные цилиндрическим шарниром. Точка А фиксирована относительно ППМ 1 и представляет собой среднюю точку на оси отверстия. Точка В фиксирована относительно ППМ 2 и представляет собой точку на оси пальца, равноудаленную от опорных плоскостей. Система координат $Ax''y''z''$ жестко связана с ППМ 1, ее ось Az'' параллельна оси отверстия шарнира, остальные направлены произвольно. При разработке ММ приняты допущения: есть радиальный (δ_p) и осевой (δ_o) зазор; длина шарнира мала, поэтому реакция-момент в шарнире не возникает; параметры шарнира зависят от направления деформации (радиальное или осевое). Математическая модель имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{r}_B'' &= (C'')^T [(C')^T (\bar{r}_{C2} + (C'')\bar{r}_B'' - \bar{r}_{C1}) - \bar{r}_A']; & D_p &= \sqrt{x_B''^2 + y_B''^2}; \\ F_p &= \begin{cases} c_p \left(D_p - \frac{\delta_p}{2} \right) + \beta_p v_p & \text{при } D_p > \frac{\delta_p}{2}; \\ 0 & \text{при } D_p \leq \frac{\delta_p}{2}; \end{cases} \\ F_o &= \begin{cases} c_o \left(z_B'' - \frac{\delta_o}{2} \text{sign} z_B'' \right) + \beta_o v_{ABz}'' & \text{при } |z_B''| > \frac{\delta_o}{2}; \\ 0 & \text{при } |z_B''| \leq \frac{\delta_o}{2}; \end{cases} \\ \bar{v}_{AB}'' &= (C'')^T [(C')^T (\bar{v}_{C2} + (C'')(\bar{\omega}_2'' \times \bar{r}_B'') - \bar{v}_{C1}) - (\bar{\omega}_1' \times \bar{r}_A')]; \\ \bar{e} &= \{ x_B'' / D_p; y_B'' / D_p; 0 \}^T; & v_p &= \bar{e} \cdot \bar{v}_{AB}''; \\ \bar{F}_1'' &= \{ F_p x_B'' / D_p; F_p y_B'' / D_p; F_o \}^T; \\ \bar{F}_1 &= (C') (C'') \bar{F}_1''; & \bar{F}_2 &= -\bar{F}_1; \\ \bar{M}_1' &= \bar{r}_A' \times ((C'') \bar{F}_1''); & \bar{M}_2'' &= (C'')^T [((C') \bar{r}_A' + \bar{r}_{C1} - \bar{r}_{C2}) \times \bar{F}_2]; \\ \frac{\dot{A}_p}{f} &= F_p \sqrt{(\omega_{12z}'' r)^2 + v_{ABz}''^2}; & \frac{\dot{A}_o}{f} &= |F_o \omega_{12z}''| r_{cp}; \\ \bar{\omega}_{12}'' &= (C'')^T [\bar{\omega}_1' - (C')^T (C'') \bar{\omega}_2'']; \end{aligned} \right.$$

где \vec{r}_B^m - радиус-вектор точки B в СК $AX^mY^mZ^m$; (C^m) - матрица направляющих косинусов СК $AX^mY^mZ^m$ в СК $C_1X^1Y^1Z^1$; $\vec{r}_{C_1}, \vec{r}_{C_2}$ - радиус-векторы центров масс ППМ 1 и 2 в СК $OXYZ$; $(C^1), (C^2)$ - матрицы направляющих ко-

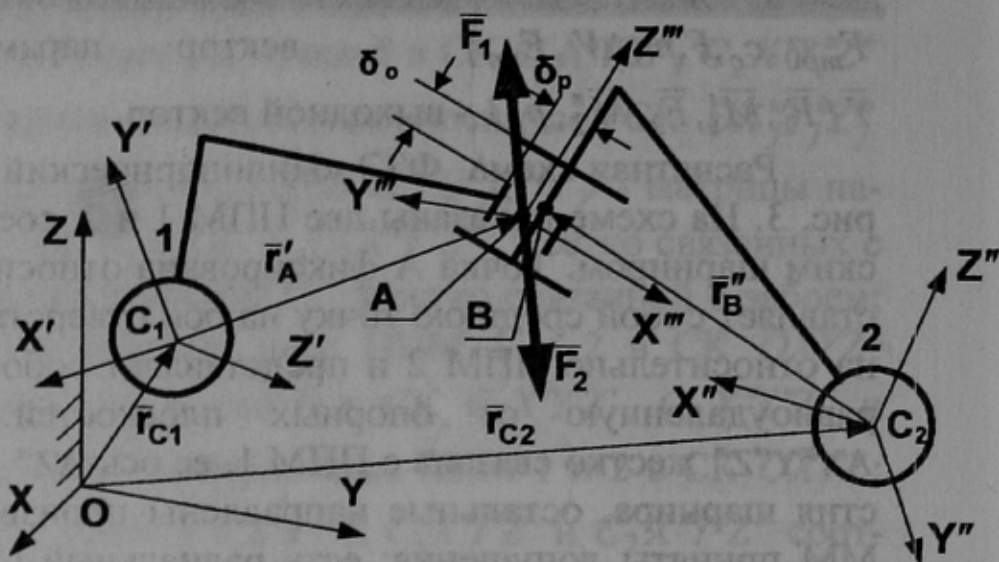


Рисунок 3 – Расчетная схема ФЗЭ «цилиндрический шарнир»

синусов СК $C_1X^1Y^1Z^1$ и $C_2X^2Y^2Z^2$, жестко связанных с ППМ 1 и 2 соответственно, в СК $OXYZ$, жестко связанной с забоем; \vec{r}_A', \vec{r}_B' - радиус-векторы точек A и B в СК, жестко связанных с ППМ 1 и 2 соответственно; D_p - радиальное смещение точки B относительно A ; δ_p, δ_o - радиальный и осевой зазоры; c_p, c_o - жесткость шарнира в радиальном и осевом направлениях; β_p, β_o - коэффициенты демпфирования в радиальном и осевом направлениях; v_p - скорость радиальной деформации шарнира; \vec{v}_{AB}^m - скорость точки B относительно A в СК $AX^mY^mZ^m$; $\vec{v}_{C_1}, \vec{v}_{C_2}$ - скорости центров масс 1 и 2 в СК $OXYZ$; $\vec{\omega}_1', \vec{\omega}_2''$ - угловые скорости масс 1 и 2 в СК $C_1X^1Y^1Z^1$ и $C_2X^2Y^2Z^2$ соответственно; \vec{e} - единичный вектор в направлении радиальной деформации шарнира; \vec{F}_1^m - реакция в шарнире, приложенная к первой ППМ в СК $AX^mY^mZ^m$; \vec{F}_1, \vec{F}_2 - реакции в шарнире, приложенные к ППМ 1 и 2 в СК $OXYZ$; \vec{M}_1', \vec{M}_2'' - моменты реакций в шарнире относительно точек C_1 и C_2 , приложенные к ППМ 1 и 2 в СК $C_1X^1Y^1Z^1$ и $C_2X^2Y^2Z^2$ соответственно; $\frac{A_p}{f}, \frac{A_o}{f}$ - отнесенные к коэффициенту трения значения работы сил трения на пальце и на осевых опорных плоскостях шарнира соответственно; $\vec{\omega}_{12}^m$ - вектор угловой скорости ППМ 1 относительно ППМ 2 в СК шарнира; r, r_{cp} - радиус пальца и средний радиус, на котором происходит проскальзывание на осевых опорных плоскостях.

Математическая модель как вектор-функция имеет вид:

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

где $\bar{X}\{\bar{Y}_1, \bar{Y}_2\}$ - входной вектор (\bar{Y}_1, \bar{Y}_2 - выходные вектора ППМ 1 и 2); $\bar{P}\{\bar{r}'_A, \bar{r}''_B, (C^m), \delta_p, c_p, \beta_p, \delta_o, c_o, \beta_o, r, r_{cp}\}$ - вектор параметров;
 $\bar{Y}\{\bar{F}_1, \bar{M}_1, \bar{F}_2, \bar{M}_2, \frac{A_p}{f}, \frac{A_o}{f}\}$ - выходной вектор.

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Разработана математическая модель гидрозажима с клиновидной поверхностью как функционально законченного элемента, позволяющая описать процесс зажатия редуктора исполнительного органа в направляющих его выдвигения.

2. Разработана математическая модель цилиндрического шарнира как функционально законченного элемента, отличающаяся изотропностью жесткости в плоскости поворота и учетом наличия в шарнире радиального и осевого зазоров.

3. Разработанные математические модели функционально законченных элементов могут быть использованы для исследования влияния параметров гидрозажимов в направляющих выдвигения и величины зазоров в шарнирах системы подвески исполнительного органа на формирование нагрузок в силовых системах проходческого комбайна.

Список источников.

1. Семенченко А.К., Кравченко В.М., Шабаев О.Е. Многокритериальный синтез горных машин и процесса их восстановления как динамических систем. – Донецк: ДонГТУ, 2002 – 312 с.
2. Семенченко А.К., Хиценко Н.В. Влияние пространственных колебаний аксиальных коронок комбайна П110 на максимальную скорость подачи // Наукові праці ДонНТУ. - Донецьк: ДонНТУ, 2004.- Вип. 83. - С. 266 - 271.
3. Кондрахин В.П., Хиценко А.И. Имитационное математическое моделирование процесса функционирования проходческого комбайна // Труды Международной научно-технической конференции "Горная электромеханика и автоматика". - Донецк, ДонНТУ. - 2003. - С. 128-138.

Дата поступления статьи в редакцию: 01.11.06