

УДК 622.232.7

А.К. Семенченко, д-р техн. наук, проф., **О.Е. Шабаетв**, канд. техн. наук, доц., **Н.В. Хиценко**, канд. техн. наук, доц., **Е.Ю. Степаненко**, аспирант
Донецкий национальный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРА ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА АКСИАЛЬНОЙ КОРОНКЕ МЕХАТРОННОГО ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА

Разработан алгоритм определения параметров стружкообразования на резах аксиальной коронки, учитывающий кинематические изменения толщины стружки и шага резания при пространственном перемещении исполнительного органа, имеющем колебательный характер. Применение алгоритма позволяет повысить на величину до 20 % точность определения нагрузок, формируемых на исполнительном органе мехатронного проходческого комбайна.

мехатроника, проходческий комбайн, внешнее возмущение, параметры среза, моделирование

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Одной из важнейших задач, стоящих перед угольной промышленностью Украины, является повышение технического уровня проходческих комбайнов (ПК) и комплексов на основе мехатронного подхода при их проектировании [1]. При этом для оценки эффективности проектируемого комбайна необходимо развитие компьютерных методов анализа рабочих процессов горных машин как мехатронных систем. Разработка математической модели (ММ) рабочего процесса мехатронного объекта «горная выемочная машина» предполагает разработку математических моделей входящих в ее состав функционально-законченных элементов (ФЗЭ) – мехатронных модулей. В соответствии со структурой горной машины как мехатронного объекта [2] одним из таких модулей является режущий орган машины.

Анализ исследований и публикаций. Разработке ММ формирования ВВВ на исполнительном органе горных выемочных машин посвящено множество работ, среди которых работы [3, 4] содержат ММ, наиболее полно описывающие процесс формирования ВВВ на аксиальной коронке. Следует отметить, что ММ, приведенная в работе [3], наиболее точно описывает процесс стружкообразования на контактирующем с горным массивом резце, что особенно важно при моделировании рабочего процесса ПК с регулируемым приводом резания, однако не предназначена для исследований динамического

функціонування виконавчого органу, т.к. не враховує вихід різців із ліній різання внаслідок коливань коронки в процесі обробки забою. ММ, приведена в роботі [4], розроблена для задання ВВВ в складі ММ динаміки ПК з аксіальними коронками, однак не в повній мірі враховує характер формування параметрів стружки на різцах (образуюча коронка апроксимується сферою; крок різання приймається постійним), що некоректно при моделюванні робочого процесу ПК з регульованим приводом різання. Таким чином, в умовах переходу на мехатронний підхід при проектуванні ПК для моделювання їх робочих процесів існуючі ММ формування ВВВ на аксіальній коронці не можуть бути використані в вигляді, описаному в роботах [3, 4], і потребують уточнення.

Постановка задачі. Таким чином, метою роботи є розробка математичної моделі формування вектора зовнішнього впливу на аксіальній коронці мехатронного проходческого комбайна з уточненим алгоритмом визначення параметрів стружкоутворення, враховуючим коливательний характер руху виконавчого органу.

Изложение материала и результаты.

Аналіз процесу стружкоутворення.

Особливістю робочого процесу ПК є переміщення його в просторі оброблюваного забою, що відбувається під дією навантажень, формованих як в елементах машини, так і в зонах її взаємодії з зовнішнім середовищем [5]. Таким чином, при розрахунку ВВВ повинно враховуватися складне просторове руху корпусу редуктора виконавчого органу і коливання швидкості обертання коронки.

При формалізації процесу стружкоутворення були використані позначення (рис.1): i – номер різця, що контактує з забоем ($i = 1..n_p$); φ_{0i} – кут установки i -го різця на коронці; r_{yi} – відстань від вершини i -го різця до осі обертання коронки; y_{yi} – відстань від вершини i -го різця до торця коронки; n_{li} – кількість різців в лінії різання i -го різця; i' , i'' – номери різців, розташованих в лінії різання i -го різця на двох опережуючих лопастях (спіральних лініях, вздовж яких встановлені різці); $(i \pm k)$ – номери різців, розташованих в сусідніх лініях різання на більшому (+) і меншому (-) діаметрах від i -го різця, k – ціле число; $(i \pm k)'$, $(i \pm k)''$ –

номера резцов, расположенных в линии резания $(i \pm k)$ -го резца на двух опережающих лопастях $л'$ и $л''$ соответственно.

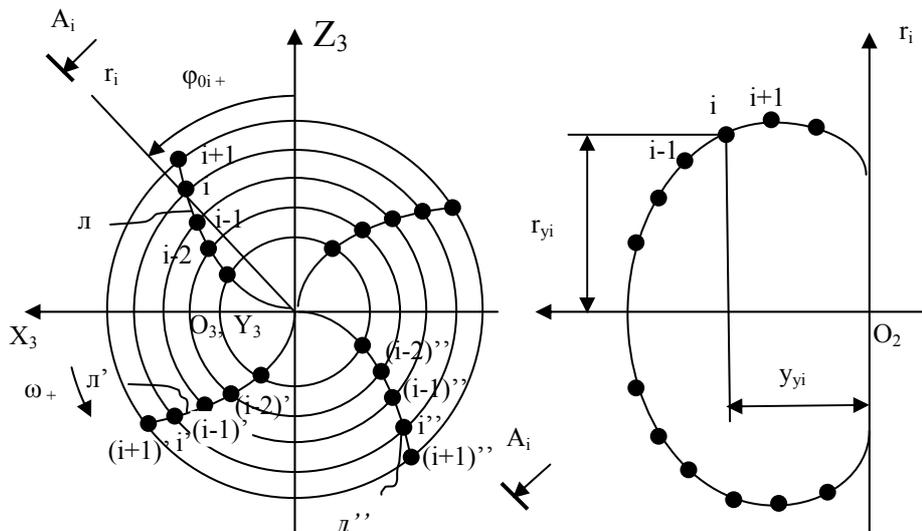


Рисунок 1.– Параметры схемы набора аксиальной коронки

Параметры стружкообразования на i -том контактирующем резце определяются следующим образом:

- толщина стружки h_i – расстояние от вершины i -того резца до поверхности разрушаемого массива, формируемой резцами опережающей лопасти в сечении забоя плоскостью A_i-A_i (рис.1), проходящей через вершину i -того резца и ось вращения коронки;

- шаг резания t_{sri} – расстояние между вершиной i -того резца и вершиной опережающего резца, находящегося в соседней линии резания, в сечении забоя плоскостью A_i-A_i .

При пространственном перемещении исполнительного органа в процессе обработки забоя за счет динамических колебаний могут происходить смещения линий резания, вследствие чего номера резцов, формирующих поверхность обнажения для i -го контактирующего резца, в соответствии со схемой набора изменяются в некотором диапазоне (примерно ± 2 резца). В качестве примера на рис. 2 приведены возможные схемы формирования параметров среза на i -м контактирующем резце в режиме бокового реза. Поэтому для расчета толщин стружек необходимо запоминать как минимум две предыдущих поверхности резания, формируемых резцами под номерами от $(i-2)'$ до $(i+2)'$ и от $(i-2)''$ до $(i+2)''$, установленными соответственно на первой $л'$ и на второй $л''$ опережающих лопастях (рис. 1). По координатам положений опережающих резцов в плоскости A_i-A_i , находим номера резцов, наиболее близко расположенных к i -тому контакти-

рующему резцу в плоскости A_i-A_i , которые формируют для него поверхность забоя: N_1 и N_2 .

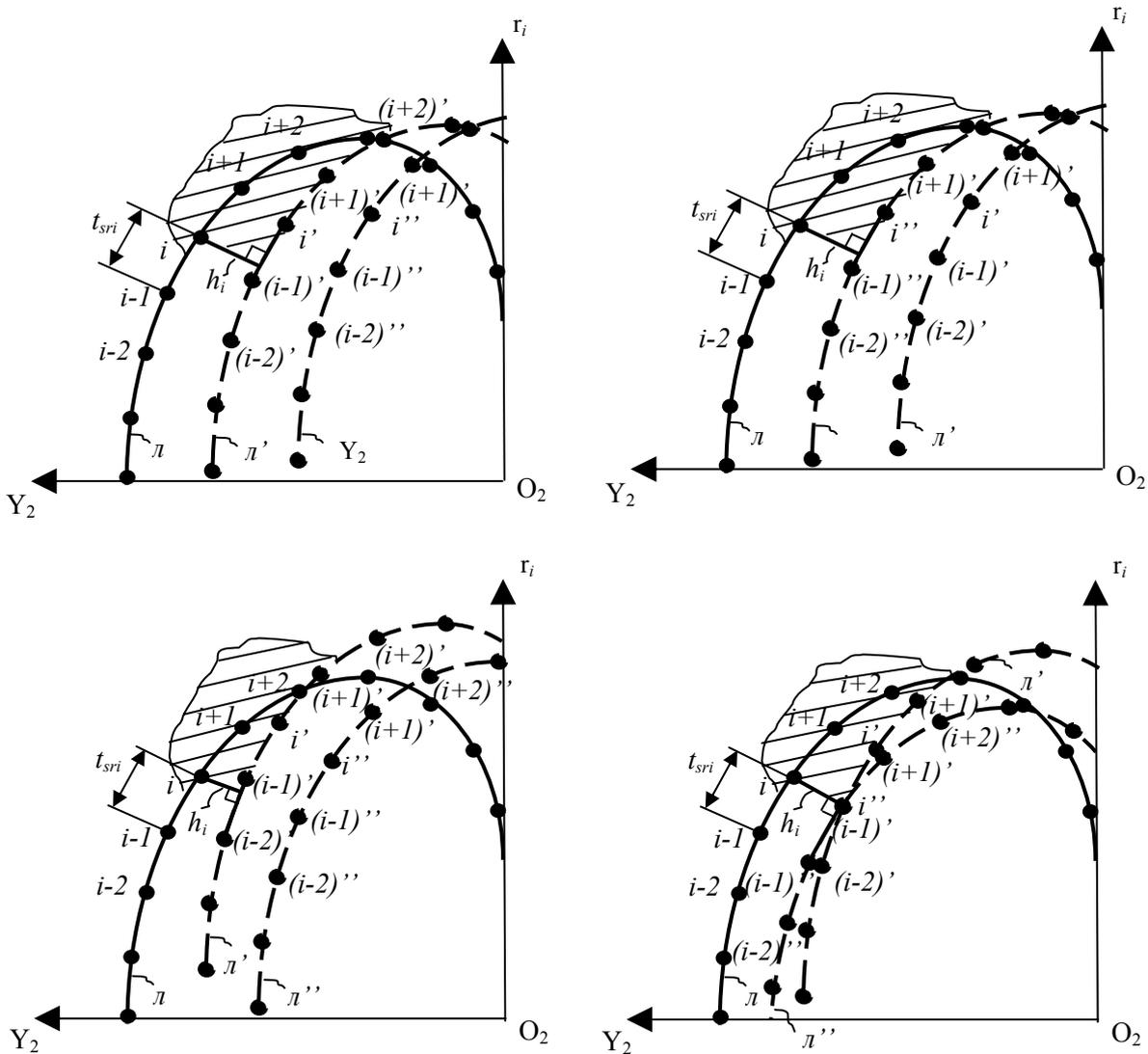


Рисунок 2. – Возможные схемы формирования параметров стружки на i -том контактирующем резце в режиме бокового реза

Толщина стружки h_i и шаг резания t_{sri} на i -том резце определяются как:

$$h_i = \frac{|N_1 N_2 \times N_1 N_i|}{|N_1 N_2|},$$

$$t_{sri} = |\bar{r}_{pi} - \bar{r}_{p(i_{cpi})}|,$$

где \bar{r}_{pi} – радиус-вектор положения вершины i -того контактирующего резца в неподвижной системе координат (СК), связанной с забоем

(см. рис. 3); $\bar{r}_{p(i_{cpi})}$ – радиус-вектор положения вершины опережающего резца i_{cpi} , находящегося в соседней линии резания, в сечении забоя плоскостью A_i-A_i в неподвижной СК.

Для оценки адекватности предложенного алгоритма определения параметров стружки была выполнена проверка, заключающаяся в сравнении объемов породы, разрушаемых в различных режимах обработки забоя: $V_{БР} = B \cdot \Delta H \cdot L_{БР}$ – в режиме бокового реза и $V_{ВЗ} = S_{ВЗ} \cdot \Delta H$ – в режиме вертикальной зарубки (B , ΔH – глубина зарубки и шаг фрезерования; $L_{БР}$ – длина бокового реза; $S_{ВЗ}$ – площадь сечения, обрабатываемого при вертикальной зарубке) с модельно полученными объемами разрушенной породы

$$V_{\text{мод}} = \Delta\varphi \sum_{i=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_k} r_{yi} \cdot h_{i,j} \cdot t_{sri,j} \quad (\Delta\varphi \text{ – шаг изменения угла поворота коронки; } j \text{ – номер положения коронки, } j = 1 \div n_k).$$

Сравниваемые результаты отличались менее чем на 5%.

Математическая модель ВВВ на аксиальной коронке.

В соответствии с [2] ММ формирования ВВВ описывает приложенный к пространственно-перемещающейся массе (ППМ), на которой установлена коронка, вектор нагрузки, формируемый на ее резцах в процессе разрушения забоя.

При задании ориентации коронки относительно выработки и ППМ «исполнительный орган» используются следующие системы координат (рис. 3):

$OXYZ$ – неподвижная СК, связанная с забоем, с вертикальной осью OZ ;

$O_1X_1Y_1Z_1$ – СК, жестко связанная с ППМ, на которой установлена коронка, ее оси совпадают с главными осями инерции ППМ;

$O_2X_2Y_2Z_2$ – СК, связанная с корпусом редуктора коронки, начало координат – точка O_2 лежит в плоскости торца коронки, а ось O_2Y_2 совпадает с осью вращения коронки;

$O_3X_3Y_3Z_3$ – СК коронки, оси O_3X_3 и O_3Z_3 которой лежат в плоскости торца коронки, а ось O_3Y_3 совпадает с осью вращения коронки.

ММ формирования ВВВ на аксиальной коронке, учитывающая кинематические изменения параметров процесса стружкообразования при пространственном перемещении исполнительного органа, имеющем колебательный характер, может быть получена путем подста-

новки полученных зависимостей для определения h_i и t_{sri} в ММ, описанную в работе [4]. Таким образом, ММ формирования ВВВ на исполнительном органе мехатронного ПК в интегрированном виде запишется как:

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

где $\bar{Y} = \{\bar{M}_{м.1}, \bar{P}_м\}$ – вектор выходных переменных; $\bar{M}_{м.1}$ – главный момент сил на резцах коронки относительно начала СК ППМ, на которой установлена коронка, в СК $O_1X_1Y_1Z_1$; $\bar{P}_м$ – главный вектор сил на резцах коронки, приведенный к началу СК ППМ, на которой установлена коронка, в СК $OXYZ$;

$\bar{\mu} = \{P_{xi}, P_{yi}, P_{zi}, M\}$ – вектор показаний датчиков, где P_{xi}, P_{yi}, P_{zi} – усилия на резцах, M – момент сопротивления на коронке, приведенный к ротору приводного двигателя;

$\bar{X} = \{(C_1), \bar{r}_м, \bar{\omega}_{м.1}, \bar{V}_м, \varphi, \omega\}$ – вектор входных переменных;

$\bar{P} = \{\bar{P}_{сн}, \bar{P}_{заб}, \bar{P}_{ус}, \bar{P}_{ст}, \bar{P}_{пр}\}$ – вектор параметров.

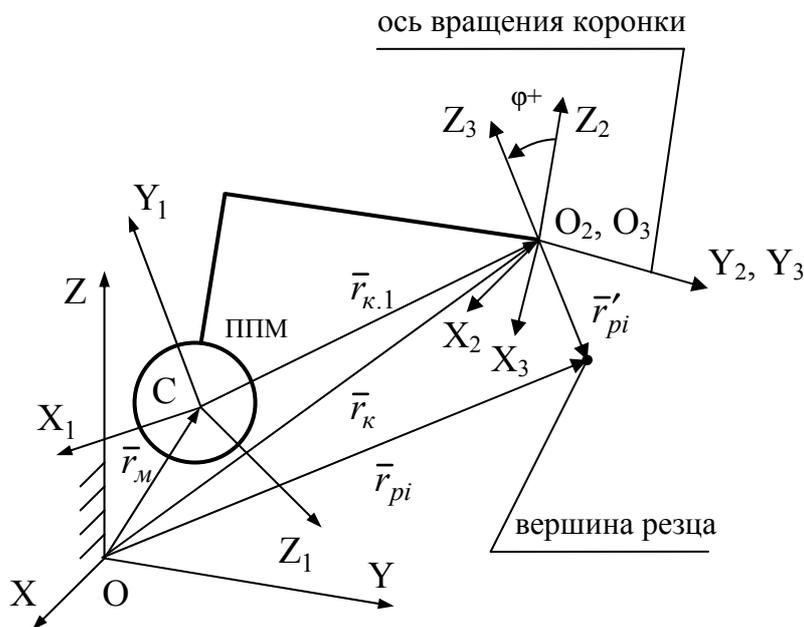


Рисунок 3. – Ориентация коронки относительно ППМ

Для реализации разработанной ММ ВВВ на аксиальной коронке был разработан алгоритм моделирования процесса формирования на-грузок, предусматривающий выполнение на каждом шаге моделирования рабочего процесса комбайна следующих этапов:

1) задание исходных данных – параметров: схемы набора резцов $\bar{P}_{сн}$; привода $\bar{P}_{пр}$; забоя $\bar{P}_{заб}$; положения коронки на стреле $\bar{P}_{см}$; зависимостей усилий на резце от режима резания $\bar{P}_{ус}$;

2) определение вектора входных переменных \bar{X} , описывающих состояние связанных с коронкой ФЗЭ на данном шаге моделирования. Компоненты вектора входных переменных: (C_1) – матрица направляющих косинусов СК $O_1X_1Y_1Z_1$ в СК $OXYZ$; \bar{r}_m – радиус-вектор центра масс ППМ в СК $OXYZ$; $\bar{\omega}_{м.1}$ – вектор угловой скорости ППМ в СК $O_1X_1Y_1Z_1$; \bar{V}_m – вектор скорости центра масс ППМ в СК $OXYZ$; ω, φ – угловая скорость вращения и угол поворота коронки, приведенные к ротору приводного двигателя;

3) формирование текущей формы проходческого забоя на основе массива данных в виде предыдущих положений вершин резцов, запомненных с некоторым шагом $\Delta\varphi$;

4) проверка резца на контакт с разрушаемым массивом и расчет параметров стружкообразования;

5) расчет ВВВ на аксиальной коронке.

Анализ результатов моделирования.

На рис. 4 приведен пример распределений параметров стружки при задании ВВВ согласно ММ [4] (h1, tsr1) и задании ВВВ согласно предложенной ММ (h2, tsr2) для ПК типа КПД. Модельные эксперименты были проведены для следующих условий: контактная прочность породы 100 МПа, глубина зарубки 0,3 м, шаг фрезерования 0,6 м, зависимости для определения усилий на резцах приняты согласно [6]. Из сравнения результатов модельных экспериментов (рис. 4) видно, что:

- при разрушении горного массива в режиме бокового реза отмечается существенное (в 1,4 раза) снижение среднего значения толщины стружки для разработанной ММ, при этом максимальное значение толщины стружки также уменьшается до 20 %. Более существенно отличается картина распределения шагов резания, что обусловлено их кинематическим изменением. Так, среднее значение шага резания для предложенной ММ увеличивается в 1,6 раз и происходит смещение распределения шагов резания в область больших значений (от 50 до 80 мм). Таким образом, значительно изменяется характер стружкообразования на резцах, что приводит к изменению от-

ношения параметров стружки t_{sri} / h_i , а следовательно, величины удельных энергозатрат на разрушение;

- при разрушении горного массива в режиме вертикальной зарубки характер распределения параметров среза практически не изменяется, что объясняется особенностями данного режима: отсутствием боковых перемещений исполнительного органа, влияния формы коронки на характер разрушения, серповидной формой стружкообразования.

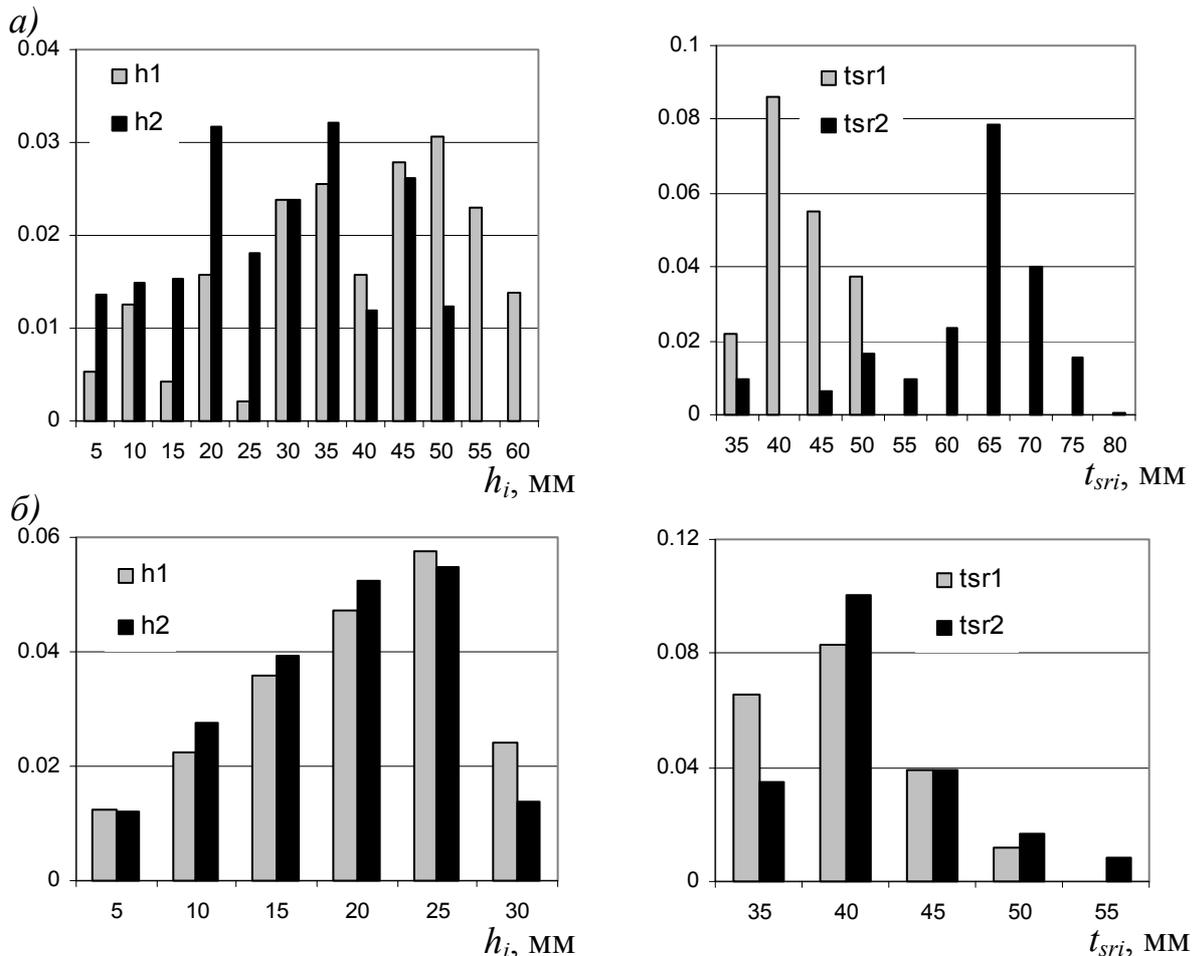


Рисунок 4. – Распределение толщин стружки и шагов резания в режимах бокового реза (а) и вертикальной зарубки (б)

Существенное отличие картины распределения параметров стружки для предложенной ММ в режиме бокового реза влечет за собой изменение величины и характера формирования нагрузок на исполнительном органе машины. Так, сравнение средних и максимальных значений нагрузок (составляющих главного вектора сил: продольной F_x , боковой F_y , вертикальной F_z , и момента сопротивления на коронке M), полученных в результате моделирования рабочего процесса ПК с использованием ММ [3] и предложенной ММ (табл.1)

показало, что для предложенной ММ ВВВ эти значения отличаются до 20%. При этом соотношение составляющих главного вектора сил между собой изменяется до 30%, т.е. существенно отличается картина нагружения исполнительного органа и машины в целом. Кроме того, учет изменения отношения параметров стружки t_{sri} / h_i позволяет уточнить значения удельных энергозатрат разрушения W до 12 % для принятых условий моделирования рабочего процесса ПК.

Таблица 1 – Относительные значения показателей нагруженности исполнительного органа при боковом резе

Средние значения составляющих главного вектора сил			Соотношения средних значений составляющих главного вектора сил между собой		
$\frac{F_{x1cp}}{F_{x2cp}}$	$\frac{F_{y1cp}}{F_{y2cp}}$	$\frac{F_{z1cp}}{F_{z2cp}}$	$\frac{F_{y1cp} / F_{x1cp}}{F_{y2cp} / F_{x2cp}}$	$\frac{F_{z1cp} / F_{x1cp}}{F_{z2cp} / F_{x2cp}}$	$\frac{F_{z1cp} / F_{y1cp}}{F_{z2cp} / F_{y2cp}}$
1.19	0.96	0.85	0.80	0.71	0.88
Максимальные значения составляющих главного вектора сил			Момент сопротивления на коронке		Удельные энергозатраты резания
			Средний	Максимальный	
$\frac{F_{x1max}}{F_{x2max}}$	$\frac{F_{y1max}}{F_{y2max}}$	$\frac{F_{z1max}}{F_{z2max}}$	$\frac{M_{1cp}}{M_{2cp}}$	$\frac{M_{1max}}{M_{2max}}$	$\frac{W_1}{W_2}$
1.06	0.94	0.94	0.91	0.91	0.89

Выводы и направление дальнейших исследований. Разработана математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке мехатронного проходческого комбайна с уточненным алгоритмом определения параметров стружкообразования, учитывающим колебательный характер движения исполнительного органа, сложную кинематику движения резцов аксиальной коронки и образующейся при этом поверхности забоя. Неучет вышеперечисленных факторов приводит к погрешности до 20 % при определении нагрузок, формируемых на исполнительном органе машины. Предложенная математическая модель формирования вектора внешнего возмущения может быть использована при моделировании рабочего процесса и обосновании параметров мехатронных проходческих комбайнов.

Список источников:

1. Семенченко А.К., Шабаяев О.Е., Семенченко Д.А., Хиценко Н.В. Перспективы создания проходческих комбайнов нового технического уровня // Горная техника 2005. Каталог-справочник. – С-Пб: ООО «Славутич». – С. 60-69.

2. Математическая модель рабочего процесса горной выемочной машины как мехатронного объекта / Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В., Степаненко Е.Ю. // Вісті Донецького гірничого ін-ту. - 2010. - №1. - С. 207-213.
3. Математическая модель вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке проходческого комбайна / Семенченко А.К., Шабаев О.Е., Семенченко Д.А., Хиценко Н.В. // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк, 2006. - Вип. 104. - С. 198-205.
4. Математическая модель резцового исполнительного органа / Семенченко А.К., Шабаев О.Е., Витковский В.Л., Семенченко Д.А. // XXI столетие - проблемы и перспективы освоения месторождений полезных ископаемых: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Днепропетровск, 12-14 окт., 1998 г. - Днепропетровск, 1998. - Т.6, № 3. - С. 53-57.
5. Оценка эффективности проходческого комбайна с интеллектуальной системой «управление-подача» исполнительного органа / Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В., Степаненко Е.Ю. // Вісті Донецького гірничого ін-ту. - 2009. - №1. - С. 207-218.
6. ОСТ 12.44.197-81. Комбайны проходческие со стреловидным исполнительным органом. Расчет эксплуатационной нагруженности трансмиссии исполнительного органа. Методика. – М., 1981. – 48 с.

А.К.Семенченко, О.Є.Шабаєв, М.В.Хиценко, О.Ю.Степаненко. Математична модель формування вектора зовнішнього обурення на аксіальній коронці мехатронного прохідницького комбайна. Розроблено алгоритм визначення параметрів стружкоутворення на різцях аксіальної коронки, який враховує кінематичні зміни товщини стружки і кроку різання при просторовому переміщенні виконавчого органу, що має коливний характер. Застосування алгоритму дозволяє підвищити на величину до 20% точність визначення навантажень, що формуються на виконавчому органі мехатронного прохідницького комбайну.

мехатроніка, прохідницький комбайн, зовнішнє збурення, параметри зрізу, моделювання

A.Semenchenko, O.Shabaev, N.Khitsenko, E.Stepanenko. The mathematical model of formation vector of external disturbances on axial crown of mechatronic heading machine. Developed the determination algorithm of cutting parameters on the cutting teeth of axial crown in consideration of kinematic change of chip thickness and blade spacing by space moving of actuator that has a vibrational character. Application of the algorithm allows to increase by up to 20% accuracy of the loads generated by the executive body of mechatronic heading machine.

mechatronic, heading machine, external disturbance, cutting parameters, simulation

Стаття надійшла до редколегії 09.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П.Кондрахин

© А.К.Семенченко, О.В.Шабаєв, Н.В.Хиценко, Е.Ю.Степаненко, 2010