

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОМБАЙНА С ВЫНЕСЕННОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАЧИ, ОСНАЩЁННОЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ

Мезникова Е.А., магистрант

Семенченко А.К., докт. техн. наук, проф.,

Донецкий национальный технический университет

Основным энергетическим сырьём для Украины является уголь, свыше 83% его запасов содержится в пластах мощностью до 1,2 м. Для обеспечения энергетической независимости нашей страны необходимо создавать высокопроизводительные и надёжные комбайны для выемки тонких пластов. Для обоснования наиболее рациональной системы подачи для этих комбайнов, проанализируем показатели их работы, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели работы очистных комбайнов, эксплуатируемых на шахтах Украины

Тип комбайна	Кол-во комбайнов в эксплуатации, шт	Средняя мощность комбайнов в пластах, м	Среднесуточная добыча, т/сут	Привод подачи тип	%
1	2	3	4	5	6
УКД300	1	1,34	1059	Электрич. частотно-регулир. БСП	0,6
УКД200-250	22	1,09	900	ВСП	
КА200	8	1,11	1079	ВСП	
УКД200	9	1,10	653	ВСП	34
КА80	10	1,07	1150	ВСП	
К103М	7	1,04	666	ВСП	
РКУ10	26	1,52	1028	Гидравлич.	16
1К101У	63	1,27	572	Гидравлич. цепная	
1ГШВ68	9	1,69	1031	Гидравлич. цепная	44,6
МК67И	3	1,03	640	Гидравлич. цепная	

## Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
“Кіровець”	4	0,86	68	Лебёдка	3,6
2КЦТГ	2	0,71	192	Лебёдка	
МВ-410Е	2	1,22	1022	Электрич. частотно- регулир. БСП	1,2 (импорт. техника)
Итого	166				

Из таблицы видно, что применение комбайнов с ВСП велико и современные ОК оснащаются приводами с частотным регулированием. Из этого можно сделать вывод: развитие и применение ВСП с частотно-регулируемым приводом является перспективным направлением угольного машиностроения Украины.

Созданию и исследованию рабочих процессов очистных комбайнов посвящены работы многих научно-исследовательских, проектно-конструкторских институтов, высших учебных заведений и заводов горного машиностроения, среди которых, в первую очередь, следует отметить Донгипроуглемаш, ДонУГИ, ИГД им. А.А. Скочинского, Донецкий национальный технический университет и многие другие.

Анализ работ, посвящённых вопросам моделирования рабочих процессов и обоснования параметров вынесенных систем перемещения показывает, что тяговый орган рассматривается как невесомая упругая нить [1...4]. В работах [1, 2, 4], посвящённых моделированию рабочих процессов ВСП, не учитываются электромагнитные переходные процессы в приводных электродвигателях. В работе [5] рассмотрено моделирование ВСП с частотно-регулируемым приводом, но не установлен характер управления системой.

Задачей данной работы является разработка более полной математической модели (ММ) перемещения комбайна с вынесенной системой подачи, оснащённой частотно-регулируемым приводом.

Принципиальная схема вынесенной системы подачи комбайна представлена на рисунке 1.

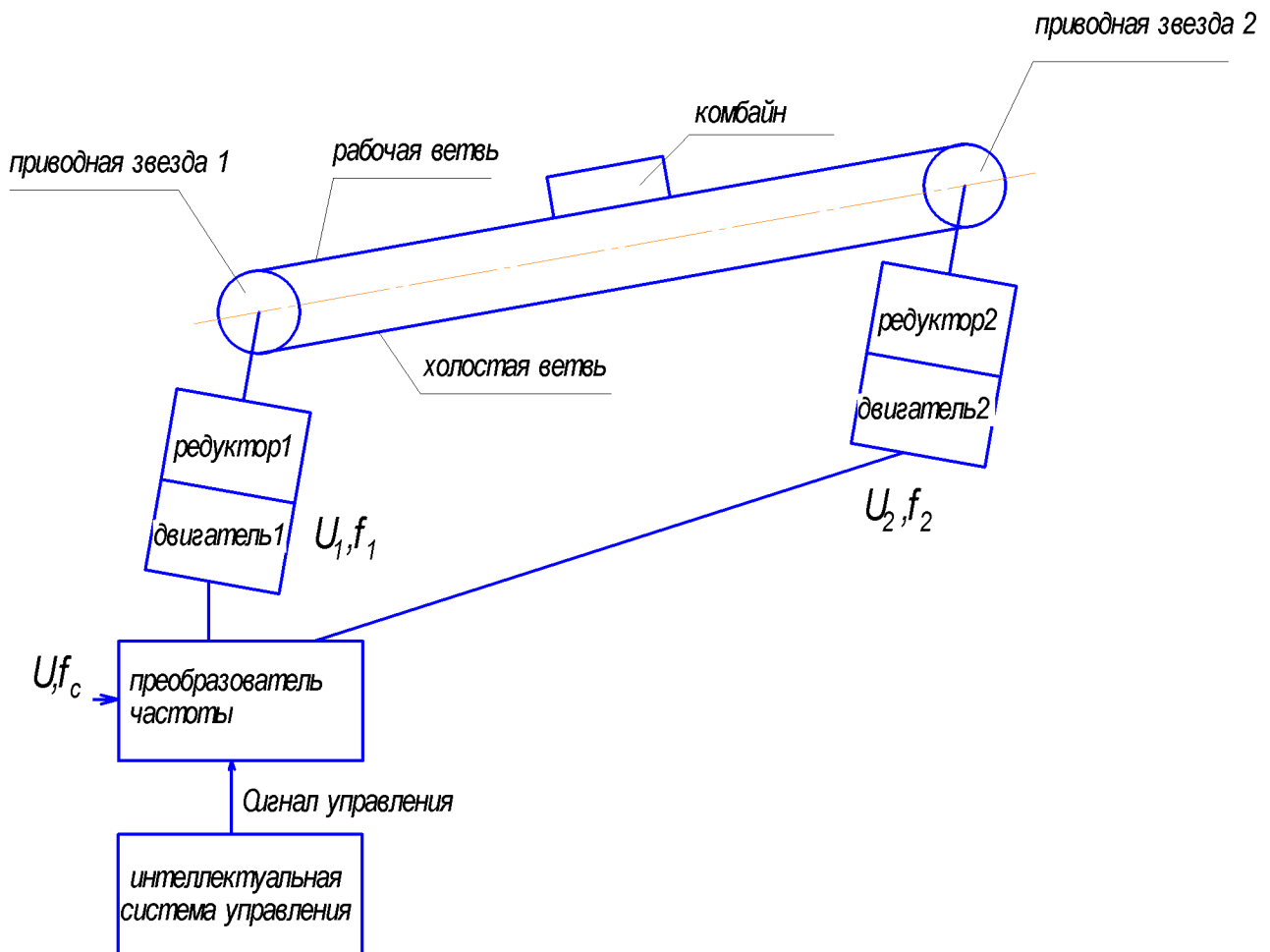


Рисунок 1 – Принципиальная схема ВСП очистного комбайна с частотно-регулируемым приводом

На схеме показан преобразователь частоты, на который подаётся переменное напряжение  $U$  с соответствующей частотой сети  $f_c$ . На выходе формируются необходимые переменные напряжения  $U_1$ ,  $U_2$  с частотами  $f_1$ ,  $f_2$ , питающие электродвигатели подачи. Моменты от двигателей 1 и 2 через выходной вал передаются редукторам, которые вращают приводные звёзды 1 и 2. Посредством звёзд тяговая цепь приводится в движение и перемещает комбайн.

Таким образом, изменение напряжения и частоты сети позволяет регулировать скорость перемещения комбайна, в соответствии с управляющим сигналом.

На основании вышеприведенной принципиальной схемы (рис. 1) была разработана динамическая схема вынесенной системы подачи, которая представлена на рисунке 2.

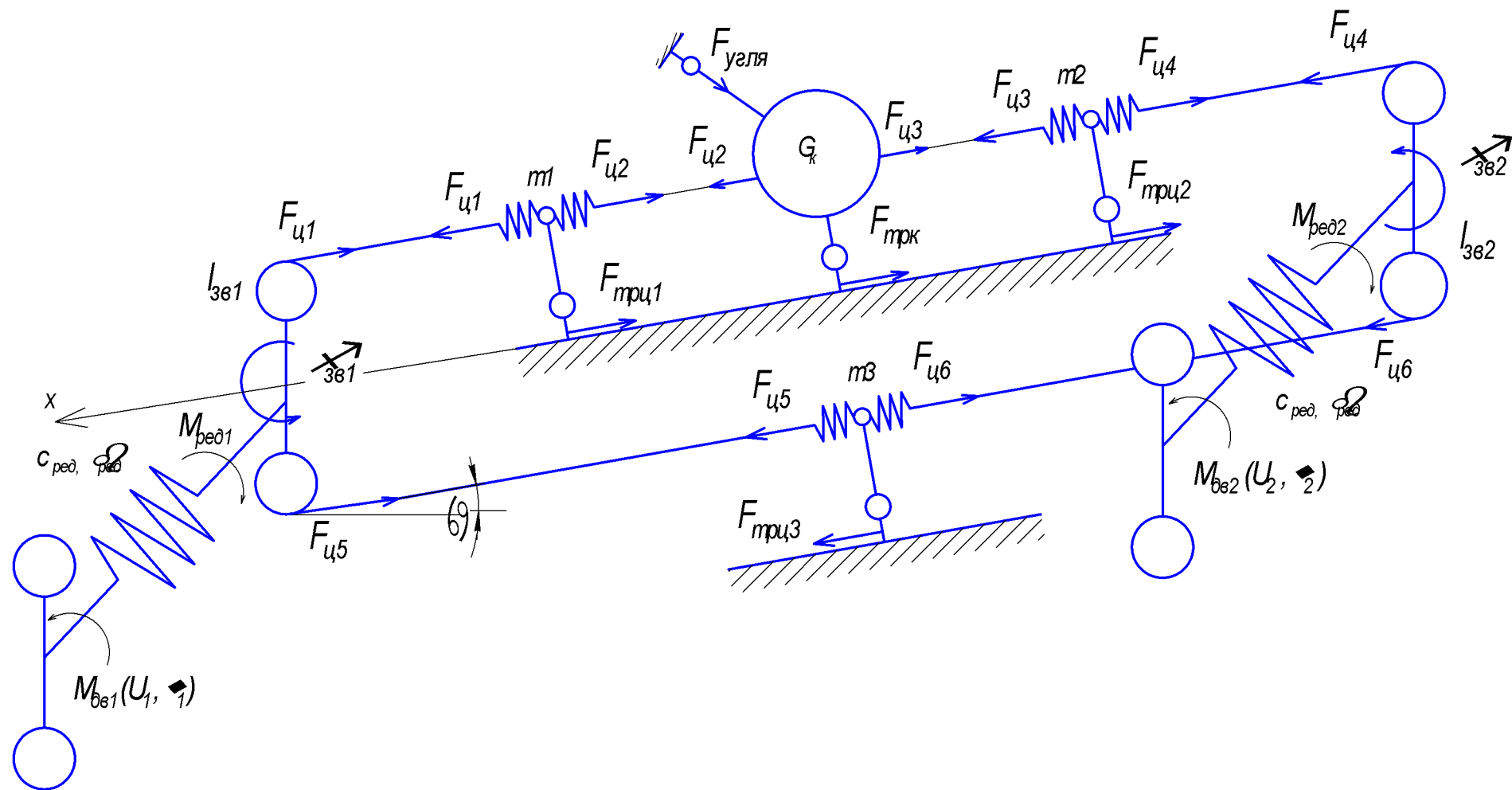


Рисунок 2 – Динамическая схема ВСП очистного комбайна с частотным регулированием

На динамической схеме ВСП ОК (рис. 2) показаны:

$M_{\delta\epsilon 1}(U_1, \omega_1)$ ,  $M_{\delta\epsilon 2}(U_2, \omega_2)$  – вращающие моменты 1-го и 2-го электродвигателей;

$\varphi_{\delta\epsilon 1}$ ,  $\varphi_{\delta\epsilon 2}$  – углы поворота роторов 1-го и 2-го электродвигателей;

$I_{\delta\epsilon 1}$ ,  $I_{\delta\epsilon 2}$  – момент инерции роторов электродвигателей;

$I_{зв}$  – момент инерции приводной звезды;

$c_{ред}$  – коэффициент жесткости редуктора привода ВСП;

$\beta_{ред}$  – коэффициент сопротивления редуктора;

$c_{\psi 1}, \dots, c_{\psi 6}$  – коэффициенты жесткости цепи, определяются по следующей зависимости:

$$c_{\psi} = \frac{c_{пог}}{l}$$

где  $c_{пог}$  – погонная жёсткость цепи;

$l$  – длина участка цепи;

$\beta_{\psi 1}, \dots, \beta_{\psi 6}$  – коэффициенты демпфирования цепи;

$\varphi_{зв 1}$ ,  $\varphi_{зв 2}$  – углы поворота приводных звёзд;

$m_k$  – масса комбайна;

$G_k$  – вес комбайна;

$m_1$  – масса тяговой цепи от комбайна до звёздочки 1;

$m_2$  – масса тяговой цепи от звёздочки 2 до комбайна;

$m_3$  – масса тяговой цепи от звёздочки 1 до звёздочки 2;

$x_k$  – перемещение комбайна;

$x_1, x_2, x_3$  – перемещение участков цепи;

$i$  – передаточное отношение редуктора;

$F_{угля}$  – внешняя нагрузка;

$F_{трк}$  – сила трения комбайна;

$F_{\psi 1}, \dots, F_{\psi 6}$  – усилия в цепях на рабочей и холостой ветвях.

$F_{тр\psi}$  – сила трения цепи определяется по зависимости:

$$F_{тр\psi} = fP_{\psi} \cos \alpha = fm_{\psi} g \cos \alpha = fq_{пог} \lg \cos \alpha$$

где  $f$  – коэффициент трения цепи о конвейер;

$q_{пог}$  – погонная масса цепи;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\alpha$  – угол падения пласта.

На основании приведенной динамической схемой ВСП ОК (рис. 2) ММ рабочих процессов ВСП очистного комбайна с частотно-регулируемым приводом запишется (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} m_k \ddot{x}_k = F_{y2} - F_{y3} - F_{y\text{угля}} - F_{\text{трк}} + G_k \sin \alpha \\ m_1 \ddot{x}_1 = F_{y1} - F_{y2} - F_{\text{трч1}} \\ m_2 \ddot{x}_2 = F_{y3} - F_{y4} - F_{\text{трч2}} \\ m_3 \ddot{x}_3 = F_{y6} - F_{y5} - F_{\text{трч3}} \\ I_{36} \ddot{\phi}_{361} = M_{\text{ред1}} \cdot i - F_{y1} R_{36} + F_{y5} R_{36} \\ I_{36} \ddot{\phi}_{362} = M_{\text{ред2}} \cdot i + F_{y4} R_{36} - F_{y6} R_{36} \\ I_{\delta 61} \ddot{\phi}_{\delta 61} = M_{\delta 1}(U_m, \omega_c) - M_{\text{ред1}} \\ I_{\delta 62} \ddot{\phi}_{\delta 62} = M_{\delta 2}(U_m, \omega_c) - M_{\text{ред2}} \\ M_{\text{ред1}} = c_{\text{ред1}}(\phi_{\delta 61} - \phi_{361} \cdot i) + \beta_{\text{ред1}}(\dot{\phi}_{\delta 61} - \dot{\phi}_{361} \cdot i) \\ M_{\text{ред2}} = c_{\text{ред2}}(\phi_{\delta 62} - \phi_{362} \cdot i) + \beta_{\text{ред2}}(\dot{\phi}_{\delta 62} - \dot{\phi}_{362} \cdot i) \\ F_{y1} = c_{y1}(\phi_{361} R_{36} - x_1) + \beta_{y1}(\dot{\phi}_{361} R_{36} - \dot{x}_1) \\ F_{y2} = c_{y2}(x_1 - x_k) + \beta_{y2}(\dot{x}_1 - \dot{x}_k) \\ F_{y3} = c_{y3}(x_k - x_2) + \beta_{y3}(\dot{x}_k - \dot{x}_2) \\ F_{y4} = c_{y4}(x_2 - \phi_{362} R_{36}) + \beta_{y4}(\dot{x}_2 - \dot{\phi}_{362} R_{36}) \\ F_{y5} = c_{y5}(x_3 - \phi_{361} R_{36}) + \beta_{y1}(\dot{x}_3 - \dot{\phi}_{361} R_{36}) \\ F_{y6} = c_{y6}(\phi_{362} R_{36} - x_3) + \beta_{y6}(\dot{\phi}_{362} R_{36} - \dot{x}_3) \end{array} \right. \quad (1)$$

Система (1) описывает движение комбайна ( $x_k, \dot{x}_k$ ), движение цепи на рабочей ветви ( $x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2$ ), движение цепи на холостой ветви ( $x_3, \dot{x}_3$ ), вращение звёздочёк ( $\phi_{361}, \dot{\phi}_{361}, \phi_{362}, \dot{\phi}_{362}$ ) и двигателей ( $\phi_{\delta 61}, \dot{\phi}_{\delta 61}, \phi_{\delta 62}, \dot{\phi}_{\delta 62}$ ).

Для реализации модели необходимо задать внешнюю нагрузку ( $F_{y\text{угля}}$ ) и силу трения комбайна о конвейер ( $F_{\text{трк}}$ ), а также описать характер изменения момента электродвигателей.

Для описания  $F_{\text{трк}}$  и  $F_{y\text{угля}}$  необходимы модели, которые адекватно будут отображать процессы формирования этих сил.

Сила трения комбайна о конвейер определяется по зависимости:

$$F_{mp} = f \cdot G_k \cdot \cos(\alpha), \quad (2)$$

Коэффициент трения  $f$  и внешняя нагрузка могут быть описаны функциями или постоянными величинами. Для обоснования их моделей исследуем характер перемещения комбайна в зависимости от вида их задания (рис. 3, 4).

Коэффициент трения в виде функции представлен следующей математической моделью:

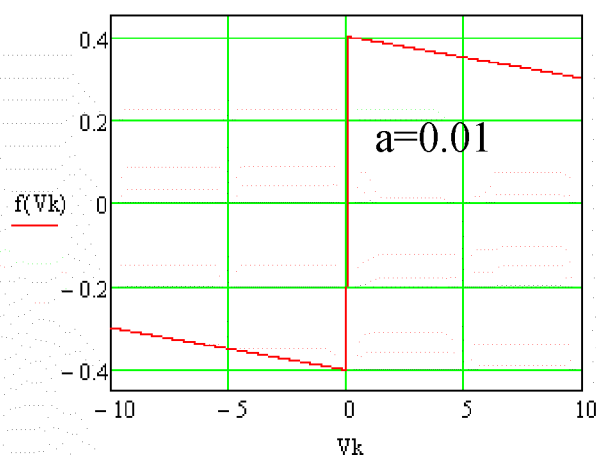
$$f = \begin{cases} -0.4 - a(V_k + 0.0001) & \text{если } V_k \leq -0.0001 \\ 4000 \cdot V_k & \text{если } -0.0001 < V_k \leq 0.0001, \\ 0.4 - a(V_k - 0.0001) & \text{иначе} \end{cases} \quad (3)$$

где  $V_k$  – скорость комбайна;

$a$  – коэффициент пропорциональности.

На рисунке 3 изображена зависимость изменения коэффициента трения от скорости движения комбайна.

а)



б)

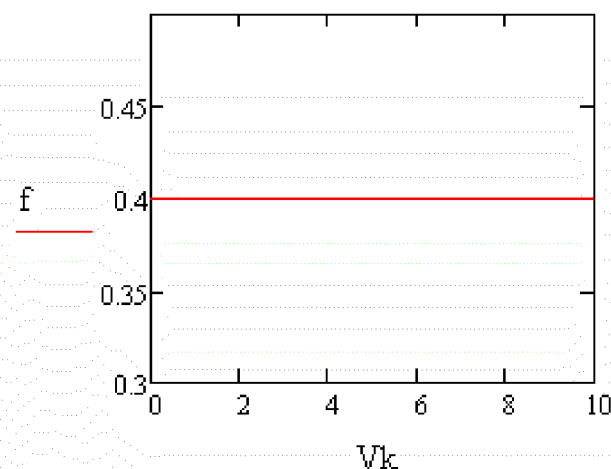


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения ОК

а) – коэффициент трения задан функцией (3);

б) – коэффициент трения задан постоянной величиной

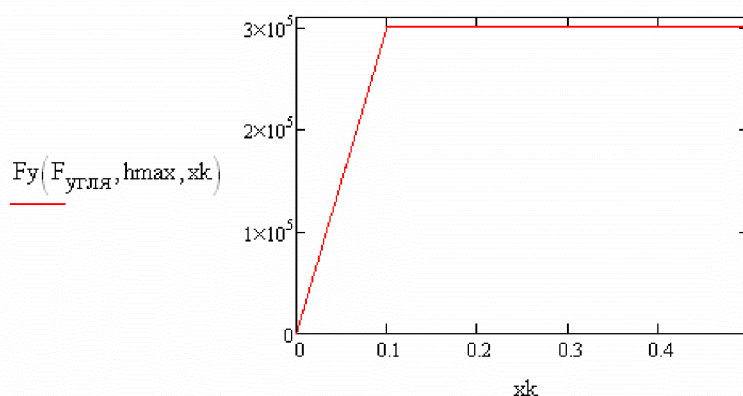
Внешняя нагрузка на исполнительные органы очистного комбайна от разрушаемого массива, в виде функции представлена следующей ММ:

$$F_{\text{угля}} = \begin{cases} F_{\text{угля}} \cdot h_{\text{max}}^{-1} \cdot x_k & \text{если } 0 < x_k \leq h_{\text{max}} \\ F_{\text{угля}} & \text{если } x_k > h_{\text{max}} \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $h_{\text{max}}$  – максимальная толщина стружки.

На рисунке 4 изображены характеры изменения внешней нагрузки  $F_{\text{угля}}$  при перемещении комбайна.

а)



б)

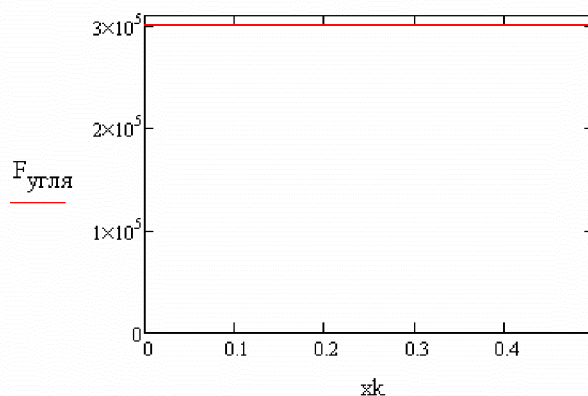


Рисунок 4 – Характер изменения внешней нагрузки при перемещении ОК

а) нагрузка задана функцией

б) нагрузка – величина постоянная

На рисунке 5 приведены изменения скоростей и величины перемещения комбайна во времени при различных видах заданиях внешней нагрузки и силы трения:



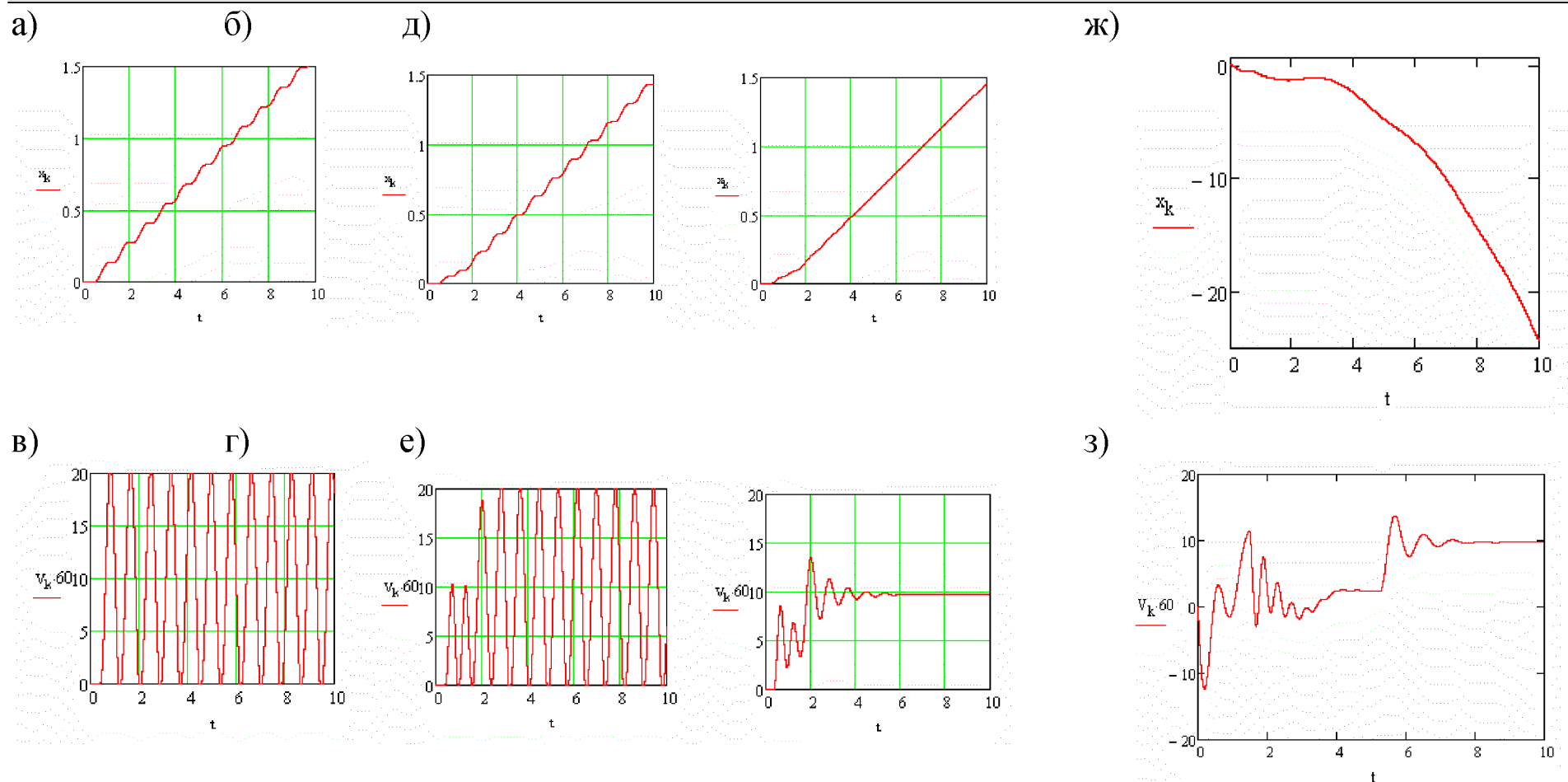


Рисунок 5 – Изменение скорости ( $V_k$ ) и величины перемещения ( $x_k$ ) комбайна во времени при различных видах заданиях внешней нагрузки и величины коэффициента трения

- а), в) – внешняя нагрузка и коэффициент трения заданы постоянными функциями (холостой ход),  
 б), г), д), е) – работа под нагрузкой при различных коэффициентах демпфирования  
 ж), з) – внешняя нагрузка и коэффициент трения величины постоянные

Из анализа рисунка 5 следует, что при функциональном задании коэффициента трения и внешней нагрузки, разработанная математическая модель адекватно описывает процесс перемещения комбайна. Также на адекватность результатов моделирования значительно влияет выбор коэффициента демпфирования цепи.

Выводы:

1. Вынесенная система подачи с частотным регулированием является перспективным направлением совершенствования очистных комбайнов для выемки тонких пластов.
2. Разработанная математическая модель вынесенной системы подачи очистного комбайна с частотно-регулируемым приводом, при функциональном задании коэффициента трения и нагрузки от разрушаемого массива, адекватно описывает процесс перемещения комбайна и формирование её нагруженности с учётом интеллектуальной системы управления.
3. Математическая модель может быть использована для установления закономерностей рабочего процесса вынесенной системы подачи и обоснования её параметров при создании современных и модернизации существующих комбайнов для выемки тонких пластов.

Список источников.

1. Бойко Н.Г. Динамика очистных комбайнов /Н.Г.Бойко. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2004. – 206 с.
2. Кондрахин В.П. Имитационная математическая модель динамических процессов очистных комбайнов высокой энерговооружённости с вынесенной системой подачи /В.П.Кондрахин, В.Г.Гуляев, В.Л.Головин //Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна /Донец. нац. техн. ун-т. – 2006. – Вип.113. – С.123-130.
3. Дубинин С.В. Переходные процессы в системе подачи угольных комбайнов с электромагнитными муфтами скольжения /С.В.Дубинин, И.Т.Сидоренко //Известия вузов. Горный журнал. 1987. – С. 88-93.
4. Подцепаев В.В. Математическая модель вынесенного привода подачи комбайна для тонких пластов //Науч. тр. ИДГ им. А. А. Скочинского. – 1983. – Вып. 218. – С. 56-62.
5. Кондрахин В.П. Математическая модель для исследования рабочих процессов частотно-регулируемой вынесенной системы перемещения очистного комбайна /В.П.Кондрахин, А.А.Мельник, В.В.Косарев, Н.И.Стадник, А.В.Мезников //Решение научно-технических проблем при создании и внедрении современного горно-шахтного оборудования. Сборник научных трудов ГП «Донгипроуглемаш» под общей редакцией кандидата технических наук В.В. Косарева, доктора технических наук Н.И. Стадника /Донецк – Астро, 2008 – С. 351-369.