

УДК 622.232.72

Н.Г. Бойко, д-р техн. наук, проф.
Донецкий национальный технический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ НАГРУЗКИ ПРИВОДА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА

В работе рассматриваются пути снижения неравномерности нагрузки, формирующейся в приводе исполнительного органа очистного комбайна для тонких пологих пластов, как низко, - так высокочастотной ее составляющей

комбайн, шнек, нагрузка, неравномерность, оптимизация

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Оптимизация системы привода исполнительного очистного комбайна, которая представляет собой многомассовую динамическую систему, находящуюся под действием случайного внешнего возмущения, является одной из важных задач, как в научном, так и практическом значении. Снижение неравномерности нагрузки дает возможность повысить производительность комбайна и его ресурс практически без дополнительных затрат.

Анализ исследований и публикаций. Вопросу снижения неравномерности нагрузки, формирующейся в приводе исполнительного органа очистного комбайна, посвящено много работ, среди которых в первую очередь следует отметить работы автора [см., например, 1-3], а также работы др. исследователей [см., например, 4, 5]. Только в работах автора снижение неравномерности нагрузки рассматривается комплексно – неравномерность низкочастотной составляющей и неравномерность высокочастотной составляющей.

Постановка задачи. Оптимизация электромеханической динамической системы, каковой является привод исполнительного органа очистного комбайна, сводится к снижению неравномерности его нагрузки. Применительно к рассматриваемой динамической системе снижение неравномерности нагрузки может быть осуществлено двумя путями. Во-первых, *снижение неравномерности низкочастотной (практически детерминированной, обусловленной неравномерностью схемы набора режущего инструмента) нагрузки*, во-вторых, *снижение высокочастотной составляющей нагрузки*. Последняя обусловлена динамическими свойствами привода и характером внешнего возмущения.

Изложение материала. Снижение низкочастотной составляющей нагрузки зависит как от особенностей привода, так и исполнительного, точнее, рабочих органов комбайна и может быть достигнуто следующим образом. В случае шнеков большого диаметра, когда рабочий объем шнека, значительно больше объема поступающего в него угля за оборот, погрузка разрушенного угля шнеком, которая совмещена в нем во времени и пространстве, производится с незначительными затратами энергии. Достаточно сказать, что мощность погрузки разрушенного угля в этом случае не превышает, как правило, 10 % от мощности двигателя привода. В этом случае снижение неравномерности низкочастотной составляющей момента сил сопротивления достигается путем «уравновешивания» схемы набора режущего инструмента. Это означает, что режущий инструмент должен быть расположен на рабочем органе так, чтобы углы между проекциями резцов на плоскость, перпендикулярную оси вращения шнека, были равными между собою. В этом случае суммарная толщина среза резцами, одновременно находящимися в контакте с разрушаемым пластом, не изменяется, как функция угла поворота шнека, и низкочастотная составляющая момента сил сопротивления (детерминированная составляющая нагрузки) остается практически постоянной.

В случае шнеков малого диаметра, когда рабочий объем шнека соизмерим или даже меньше объема поступающего в него угля, уголь, находящийся в межлопастном пространстве шнека, находится в напряженном состоянии (давление угля на лопасть шнека достигает 120 кПа [6]), выгрузка угля производится в силовом режиме. Достаточно сказать, что мощность погрузки угля в этом случае достигает практически 30 % от мощности двигателя (или двигателей при многодвигательном приводе) привода. По данным наших тензометрических исследований мощность погрузки угля указанными шнеками достигала 52 кВт [6]. При этом неравномерность низкочастотной составляющей (тоже практически детерминированной составляющей) нагрузки от погрузки угля составляла 1,3, т.е. амплитуда этой нагрузки составляет 30 % от ее математического ожидания. В этом случае снижение неравномерности общей нагрузки достигается путем формирования низкочастотной составляющей от разрушения пласта по амплитуде, равной амплитуде от погрузки угля, и ориентирование их (амплитуд) в противофазе друг с другом. Суммарная низкочастотная составляющая нагрузки, как показывает опыт применения таких шне-

ков и в шахтных условиях, практически равномерная и не зависит от угла поворота шнека.

Аналитически выравнивание неравномерности низкочастотной составляющей суммарного момента сил сопротивления запишем в виде

$$M_c = M_{c.p} + M_{c.n} + M_{c.p}^a \sin(\omega t + \theta_p) + M_{c.n}^a \sin(\omega t + \lambda_n). \quad (1)$$

При этом

$$M_{c.p}^a = M_{c.n}^a, \quad \sin(\omega t + \theta_p) = -\sin(\omega t + \lambda_n). \quad (2)$$

Тогда
$$M_c = M_{c.p} + M_{c.n}. \quad (3)$$

Здесь и выше $M_c, M_{c.p}, M_{c.n}, M_{c.p}^a, M_{c.n}^a$ – моменты сил сопротивления, соответственно, суммарный и средние значения от разрушения пласта и от погрузки угля и их амплитуды, ω – частота изменения моментов, θ_p, λ_n – фазы моментов от разрушения пласта и погрузки угля.

С учетом (2) выражение (1) примет вид

$$M_c = M_{c.p} + M_{c.n} + M_{c.p}^a [\sin(\omega t + \theta_p) + \sin(\omega t + \lambda_n)]. \quad (4)$$

В частном случае, положив $\lambda_n = 0$ для схем набора режущего инструмента двухлопастных шнеков комбайнов типа 1К-101У, К-103М фаза $\theta_p = \pi$.

Тогда
$$M_c = M_{c.p} + M_{c.n}. \quad (5)$$

Графически выравнивание неравномерности суммарного момента сил сопротивления имеет вид, показанный на рис. 1.

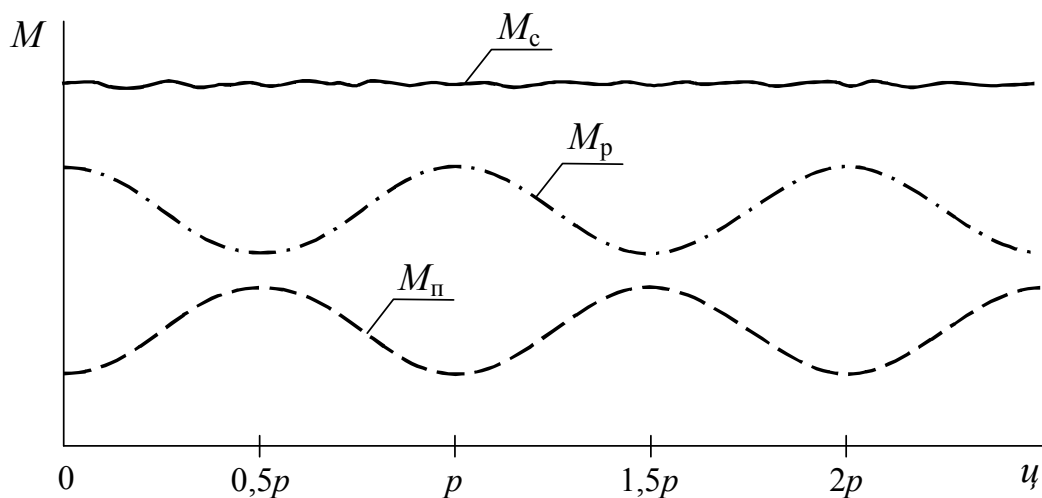


Рис. 1 – Графическое представление выравнивание суммарного момента сил сопротивления: M_c, M_p, M_n – моменты сил сопротивления, соответственно, суммарный, от разрушения пласта и погрузки угля

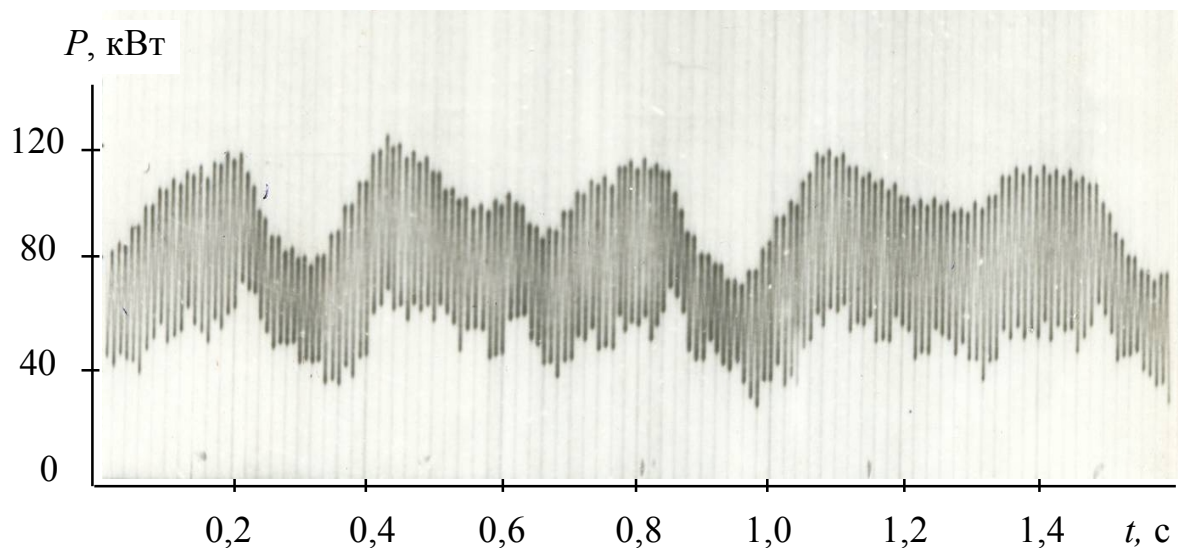


Рис. 2 – Фрагмент осциллограммы мгновенной мощности комбайна типа К-103 при оснащении его серийными шнеками

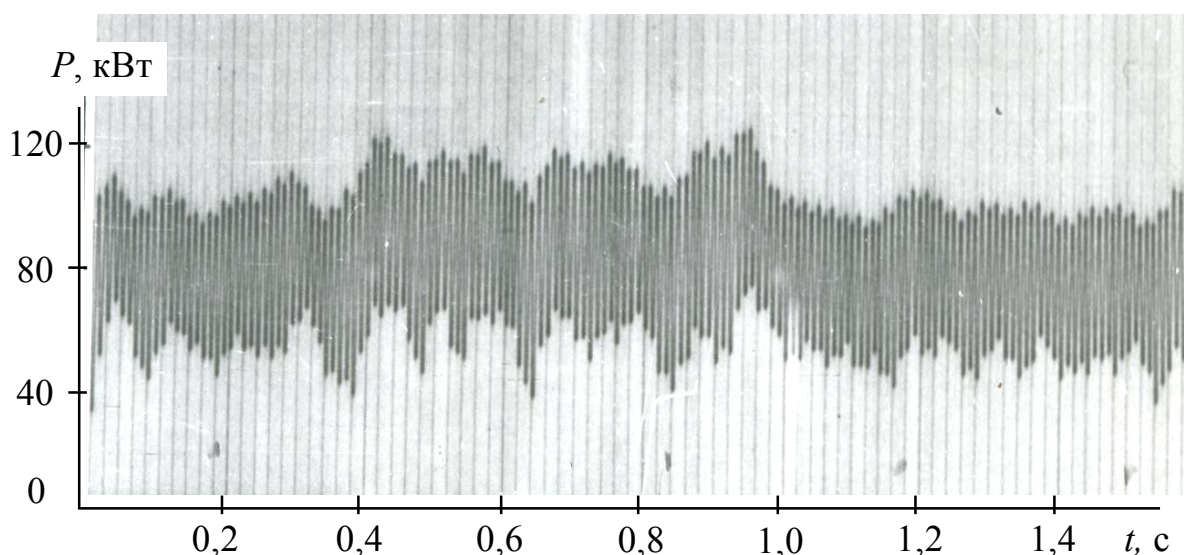


Рис. 3 – Фрагмент осциллограммы мгновенной мощности комбайна типа К-103 при оснащении его шнеками с оптимальными параметрами

Из приведенных осциллограмм мгновенной мощности двигателя системы привода исполнительного органа комбайна типа К-103 видно, что при оснащении его шнеками, схема набора которых выполнена с учетом приведенных выше зависимостями (шнеками улучшенной конструкции), неравномерность низкочастотной составляющей нагрузки значительно ниже неравномерности нагрузки при оснаще-

нии комбайна серийными шнеками. Коэффициент неравномерности низкочастотной составляющей нагрузки уменьшился с 1,45 до 1,15.

В случае разветвленной схемы привода снижение неравномерности низкочастотной составляющей нагрузки может быть выполнено одним из указанных выше методов в зависимости от того, каким шнеками оснащен комбайн – шнеками малого или большого диаметра.

Снижение неравномерности высокочастотной составляющей нагрузки практически может быть достигнуто в настоящее время только одним путем, а именно: увеличение рассеивающей способности привода или изменением (увеличением) его диссипативной характеристики.

Практическое выполнение этого способа снижения неравномерности высокочастотной составляющей нагрузки, т.е. оптимизировать привод без дополнительных затрат может быть осуществлено для очистных комбайнов тонких пологих пластов со шнеками малого диаметра. В качестве демпфирующей среды можно использовать выгружаемый шнеком уголь, который находится в напряженном состоянии.

Диссипативная характеристика рабочего органа, вращающегося в напряженной среде выгружаемого угля, определялась расчетным путем по осциллограммам затухающих колебаний момента на валу шнека. При этом набрасывание нагрузки производилось импульсно в режиме нормальной его работы по выгрузке угля на полноразмерном стенде [3]. Импульс нагрузки на шнек осуществлялся путем отрыва приваренного к нему штыря при ударе шнека о подведенную балку в установившемся режиме по погрузке угля.

После удара и отрыва штыря работа комбайна по погрузке угля продолжалась в том же режиме в течение 10-15 с, т.е. до затухания колебаний упругого момента, обусловленного импульсом нагрузки, рис. 4.

Установлено, что *выгружаемый рабочим органом уголь, находясь в напряженном состоянии, обладает упругоэластическим свойством – при достижении определенной величины давления и дальнейшем его сжатии давление стабилизируется. Об этом свидетельствуют фрагмент осциллограммы процесса выгрузки угля шнеком комбайна типа К-103, приведенный на рис. 5. В давлении угля на лопасть шнека явно выделяется три зоны – зона нарастания, зона постоянного давления и зона снижения давления.*

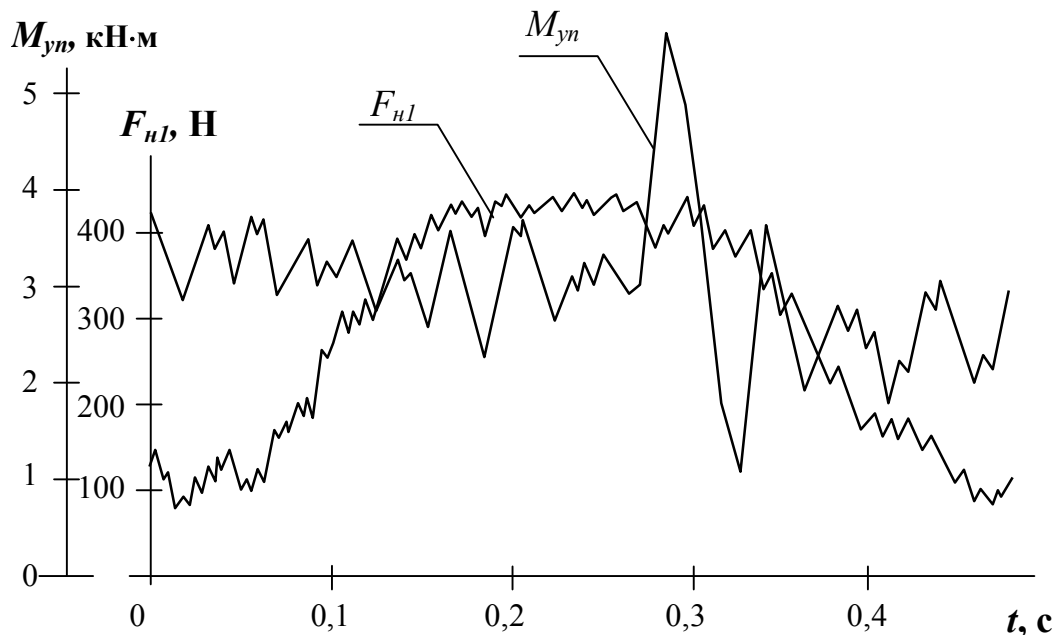


Рис. 4 – Фрагмент осциллограммы погрузки угля шнеком и импульсной его нагрузки

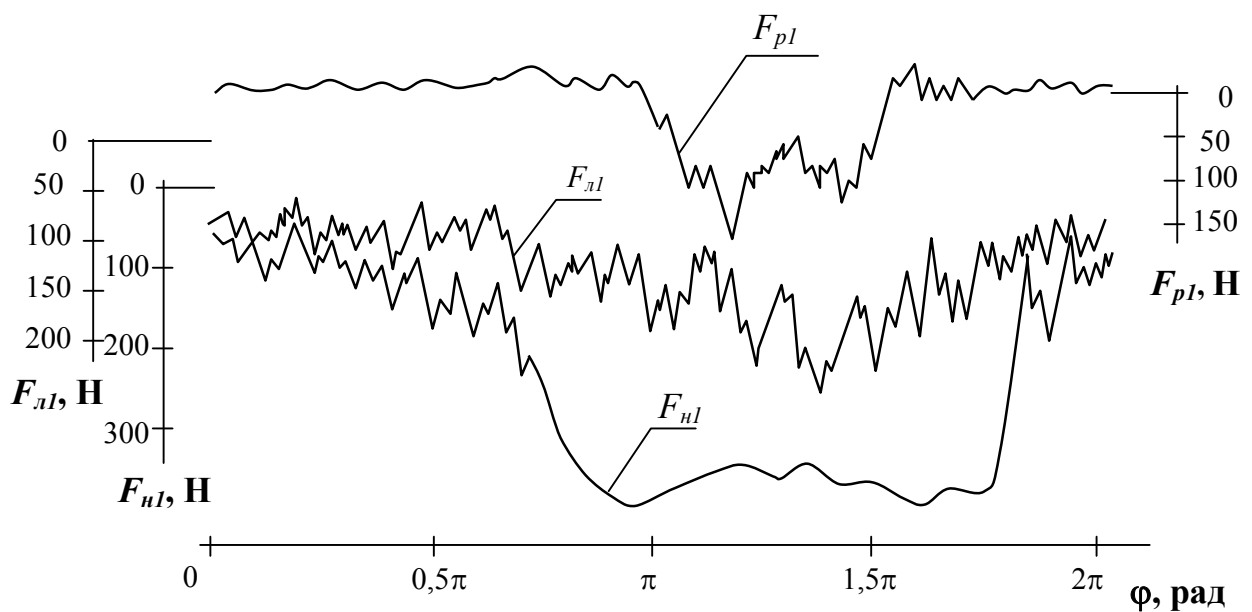


Рис. 5 – Фрагмент осциллограммы погрузки угля шнеком:
 F_{nl} – нормальная, F_{pl} – радиальная, F_{tl} – касательная составляющие давления угля на лопасть

Тогда дифференциальное уравнение колебания шнека, находящегося в напряженной среде выгружаемого им же угля и обладающего упругопластическим свойством запишется в виде:

– для нарастающей зоны давления

$$(J_1 + j_1 m_y) \ddot{\gamma}_1 + (\beta_1 + j_1 \beta_y) \dot{\gamma}_1 + (c_1 + j_1 c_y) \gamma_1 = -(C'_1 - j_1 C_y) \gamma_0, \quad (6)$$

– для зоны постоянного давления

$$J_1 \ddot{\gamma}_1 + \beta_1 \dot{\gamma}_1 + c_1 \gamma_1 = -(C_1 - N) \gamma_0, \quad (7)$$

– для зоны снижения давления

$$(J_1 - j_1 m_y) \ddot{\gamma}_1 + (\beta_1 - j_1 \beta_y) \dot{\gamma}_1 + (c_1 - j_1 c_y) \gamma_1 = -(C'_1 - j_1 C_y) \gamma_0, \quad (8)$$

где $j_1 = 0,25 f_l D_{cp}^2 \cos^{-1} \rho \sin^2 \alpha_l$, β_y , c_y – величины, характеризующие соответственно рассеяние энергии и жесткость угля, находящегося в рабочем объеме шнека, m_y – масса угля, N – постоянная, обусловленная постоянной величиной давления угля на лопасть.

Учитывая, что $J_1 \gg j_1 m_y$ и, положив $\gamma_0 = 0$, запишем приведенные выше дифференциальные уравнения в стандартной форме:

– для нарастающей зоны давления

$$\ddot{\gamma}_1 + 2n_{cy} \dot{\gamma}_1 + \omega_{cy}^2 \gamma_1 = 0, \quad (9)$$

– для зоны постоянного давления

$$\ddot{\gamma}_1 + 2n'_{cy} \dot{\gamma}_1 + \omega'_{cy}{}^2 \gamma_1 = 0, \quad (10)$$

– для зоны снижения давления

$$\ddot{\gamma}_1 + 2n''_{cy} \dot{\gamma}_1 + \omega''_{cy}{}^2 \gamma_1 = 0, \quad (11)$$

где $n_{cy} = 0,5(\beta_1 + j\beta_y)/J_1$, $n'_{cy} = 0,5\beta_1/J_1$, $n''_{cy} = 0,5(\beta_1 - j\beta_y)/J_1$,

$$\omega_{cy}^2 = (\beta_1 + j\beta_y)/J_1, \quad \omega'_{cy}{}^2 = \beta_1/J_1, \quad \omega''_{cy}{}^2 = (\beta_1 - j\beta_y)/J_1.$$

Решением полученных дифференциальных уравнений при $\omega_{cy} > n_{cy}$, $\omega'_{cy} > n'_{cy}$, $\omega''_{cy} > n''_{cy}$ будут выражения:

– для нарастающей зоны давления

$$\gamma_1 = e^{-n_{cy}t} (k_1 \sin \varphi_1 t + k_2 \cos \varphi_1 t), \quad (12)$$

– для зоны постоянного давления

$$\gamma_1 = e^{-n'_{cy}t} (k'_1 \sin \varphi'_1 t + k'_2 \cos \varphi'_1 t), \quad (13)$$

– для зоны снижения давления

$$\gamma_1 = e^{-n''_{cy}t} (k''_1 \sin \varphi''_1 t + k''_2 \cos \varphi''_1 t), \quad (14)$$

которые аналогичны между собою по виду и отличаются только величиной коэффициентов при производной угла поворота и угла пово-

рота, а следовательно, величиной $\varphi_1, \varphi_1', \varphi_1''$, и величиной постоянных интегрирования $k_1, k_2, k_1', k_2', k_1'', k_2''$ и могут быть представлены одним выражением вида

$$\gamma_1 = e^{-n_{cy}t} (k_1 \sin \varphi_1 t + k_2 \cos \varphi_1 t). \quad (15)$$

Откуда следует, что колебания рабочего органа во всех зонах давления – затухающие. При этом скорость или интенсивность затухания колебаний в нарастающей зоне давления максимальная из-за максимальной величины n_{cy} , в зоне снижения давления интенсивность затухания колебаний минимальная из-за минимальной величины n_{cy} .

Кроме того, поскольку момент инерции рабочего органа (шнека) комбайна значительно меньше момента инерции ротора двигателя или двигателей, а жесткость редуктора (трансмиссии) велика, демпфирование колебаний системы будет происходить на высших частотах – на частотах колебаний близких к частотам собственных колебаний привода. Для изучения характера затухания и установления величины коэффициентов, характеризующих затухание колебаний, достаточно иметь осциллограммы упругого момента на валу рабочего органа – шнека или барабана.

Из данных таблицы 1 следует, что безразмерный коэффициент демпфирования (аналог вязкого сопротивления) привода при наличии напряженного состояния выгружаемого шнеком угля в среднем на 48 % больше безразмерного коэффициента демпфирования привода при практическом отсутствии напряженного состояния выгружаемого угля.

Напряженное состояние выгружаемого угля обуславливает дополнительное измельчение выгружаемого угля. Поэтому повышение напряженности угля с целью увеличения демпфирования колебаний привода по высокой частоте является нецелесообразным, с одной стороны. С другой, снижение неравномерности высокочастотной составляющей нагрузки обуславливает повышение изгибной усталости элементов трансмиссии, т.е. увеличивает долговечность или ресурс элементов конструкции привода исполнительного органа. Так, например, снижение неравномерности высокочастотной составляющей нагрузки на 10 % дает возможность повысить изгибную усталость детали на 35 %.

Поэтому целесообразно, не повышая величину напряженного состояния выгружаемого угля, величина которого обуславливается

рядом трудно управляемых факторов, более рационально использовать его для снижения неравномерности высокочастотной составляющей нагрузки. Кроме того, устройства, позволяющие повысить демпфирующую способность органа, вращающегося в напряженной среде выгружаемого угля, должны быть конструктивно просты и надежны.

Автором предложено оребрение лопастей шнека в зоне наибольшего давления угля на лопасть. Эта зона, как показано в [3], находится в зоне разгрузочного торца шнека, рис. 6.

Таблица 1.

Данные статистической обработки осциллограмм упругих моментов на валу шнека комбайна типа К-103 при выгрузке угля в нормальном режиме и импульсном набрасывании нагрузки

Пленка, кадр	Нагрузка, Нм		λ, c^{-1}	δ	n_{cy}	β_{cy}
	средняя	импульса				
<i>Частота вращения шнека 80 мин⁻¹</i>						
К-103У-1а	3000	5400	125,6	0,792	15,83	0,090
К-103У-2а	2200	4680	125,6	0,620	12,34	0,070
К-103У-7а	2500	4620	147,0	0,610	14,25	0,081
К-103У-8а	3750	5040	142,7	0,950	21,80	0,124
К-103У-10а	3150	5400	125,6	1,090	21,97	0,125
К-103У-12а	2000	4580	149,5	0,640	15,14	0,086
<i>В среднем</i>	2767	4953	136,0	0,784	16,89	0,096
<i>Частота вращения шнека 94 мин⁻¹</i>						
К-103У-18а	3000	5220	115,9	0,693	12,80	0,073
К-103У-2а	3000	5900	114,6	1,038	19,15	1,109
К-103У-21	2400	5600	108,3	1,185	20,44	0,116
К-103У-22	3000	5520	108,3	1,240	21,46	0,122
К-103У-23	2900	5550	123,1	0,693	13,59	0,077
<i>В среднем</i>	2860	5558	114,0	0,970	17,50	0,100
<i>Частота вращения шнека 120 мин⁻¹</i>						
К-103У-13	2500	5160	112,1	1,058	18,89	0,107
К-103У-14	2550	5700	112,1	1,360	24,28	0,138
К-103У-15	2000	5520	120,8	1,030	19,80	0,113
К-103У-16	2100	4380	104,7	0,826	13,76	0,131
<i>В среднем</i>	2287	5190	112,4	1,070	19,20	0,122

Правильность предложенного способа снижения неравномерности высокочастотной составляющей нагрузки (момента сил сопро-

тивления в валопроводе привода) подтверждается результатами специальных тензометрических исследований погрузки угля шнеком с оребренными лопастями в зоне, прилегающей к его разгрузочному торцу, рис. 7, и полученными числовыми значениями ее снижения, табл. 2.

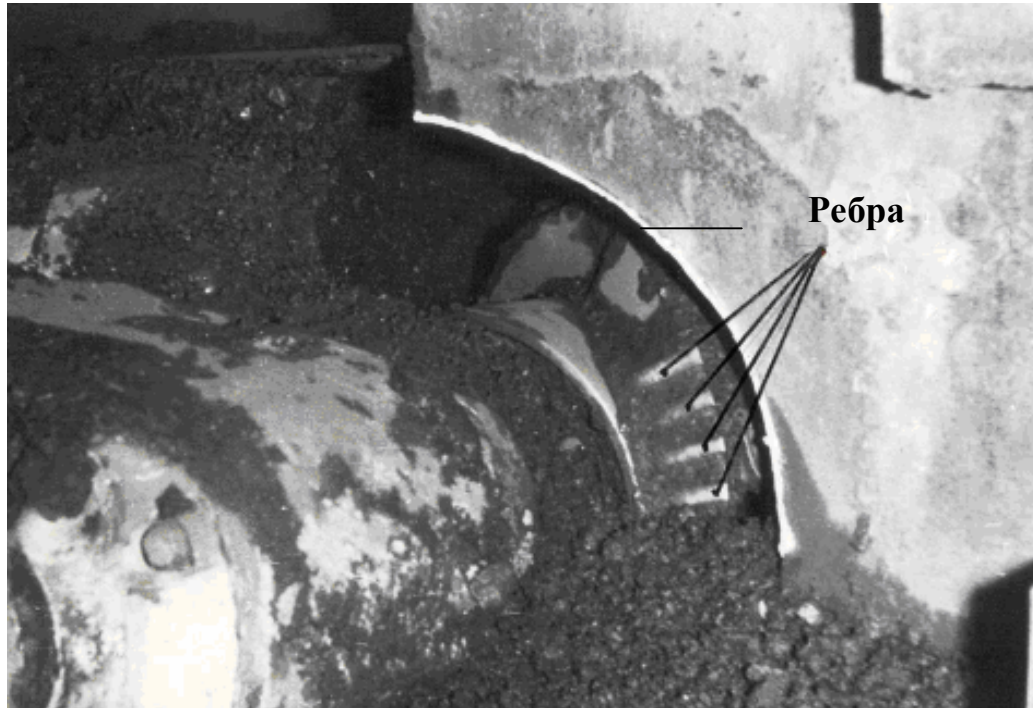


Рис. 6 – Вид шнека с оребренной лопастью

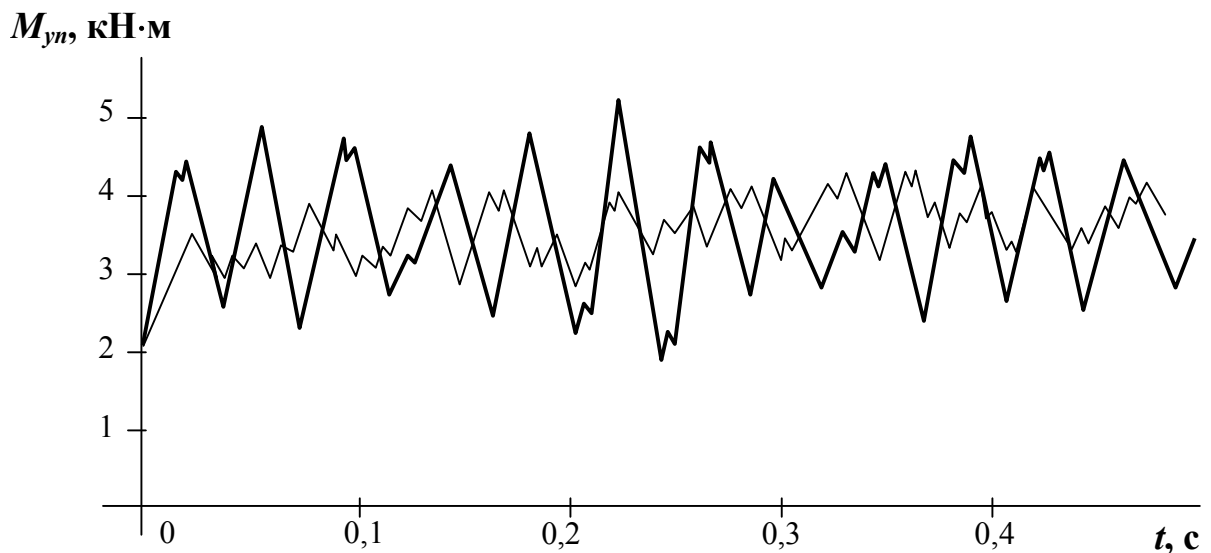


Рис. 7 – Совмещенные фрагменты осциллограмм момента сил сопротивления при погрузке угля шнеком без оребренных (жирная линия) и с оребренными лопастями

Таблиця 2.

Данные обработки осциллограмм упругих моментов
на валу шнека при погрузке угля

Пленка, кадр	V_n , м/мин	$M_{уп}$, Н·м	λ_c , с ⁻¹	$\sigma_{M_{уп}}$, Н·м	P_n , кПа
<i>Неоробреннные участки лопастей</i>					
К-103-Э10	3,0	3220	176	890	86
К-103-4Да	4,3	4160	176	1203	93
<i>В среднем</i>	3,65	3690	176	1056,5	89,5
<i>Оребренные участки лопастей</i>					
К-103-У-7А	2,5	3000	176	554	82
К-103-У-5А	3,9	3810	176	486	86
<i>В среднем</i>	3,2	3405	176	520	84

Из приведенных в табл. 2 данных обработки процесса погрузки угля следует: среднеквадратичное отклонение высокочастотной составляющей момента сил сопротивления на валу шнека практически при нормальном одинаковом давлении угля на шнек уменьшается в среднем 2 раза (с 1046 до 520 Н·м) при погрузке угля шнеком с оребренной частью лопастей.

Таким образом, на основании изложенного выше материала и полученных данных можно сделать следующее **заключение**:

1. Диссипативные свойства двигателей очистных комбайнов для тонких пластов повышены. Это обусловлено повышенной величиной критического скольжения этих типов двигателей.

2. Влияние диссипативных свойств двигателя или двигателей на демпфирующую способность привода зависит от частоты его колебаний – с повышением частоты колебаний привода влияние демпфирующей способности двигателя или двигателей на его демпфирующую способность уменьшается.

3. Диссипативные свойства редуктора (трансмиссии) привода исполнительного органа комбайнов для тонких пластов примерно такие же, как и диссипативные свойства редукторов приводов исполнительных органов очистных комбайнов для пластов средней и выше мощности. Напряженное состояние выгружаемого исполнительным органом комбайна угля обуславливает повышенные значения диссипативной характеристики привода.

Список источников:

1. Бойко Н.Г. Теория рабочих процессов комбайнов для добычи угля из тонких пологих пластов: дисс. ... докт. техн. наук / Н.Г. Бойко. – М.: МГИ, 1985.– 287 с.
2. Исполнительные органы очистных комбайнов для тонких пологих пластов / Н. Г. Бойко, А.В. Болтян, В.Г. Шевцов, Н.А. Марков; Под ред. Н.Г. Бойко. – Донецк: «Донеччина», 1996. – 223 с.
3. Бойко Н.Г. Очистные комбайны для тонких пологих пластов (теория работы, расчет и выбор параметров) / Н.Г. Бойко. – Донецк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – 476 с.
4. Динамические характеристики системы привода исполнительного органа комбайна 1К-101. Горные машины / Я.И. Альшиц, В.Г. Гуляев, Г.В. Малеев и др. – К.: МВССО Украины, 1971. - С. 61-87.
5. Гуляев В.Г. Научные основы оптимизации динамических свойств очистных комбайнов демпфирующими устройствами: дисс. ... докт. техн. наук / В.Г. Гуляев. – Днепропетровск: ИГТМ, 1986. - 488 с.
6. Бойко Н.Г. Погрузка угля очистными комбайнами / Н.Г. Бойко.– Донецк: РВА ДонНТУ, 2002. - 157 с.

Стаття надійшла до редколегії 19.04.2011

М.Г. Бойко. Оптимізація навантаження приводу виконавчого органа очисного комбайна. *У роботі розглядаються шляхи зниження нерівномірності навантаження, що формується в приводі виконавчого органа очисного комбайна для тонких пологих шарів, як низько-, так високочастотній її складовій.*
комбайн, шнек, навантаження, нерівномірність, оптимізація

N. Boyko. Optimization of the drive load of the coal cutter-load executive device. *The paper discusses ways to reduce the unevenness of the load formed in the drive of the coal cutter-load executive device for thin flat-lying seams, both low and high frequency of its component*
coal combine, auger, load, unevenness, optimization

© Бойко Н.Г., 2011