

УДК 622.232

О.Е. Шабаев (д-р техн. наук, проф.)

Н.И. Стадник (д-р техн. наук, доц.)

Н.В. Хиценко (канд. техн. наук, доц.)

И.И. Бридун (аспирант)

Донецкий национальный технический университет

А.В. Коваленко

ОП «Донгипроуглемаш»

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ РЕЗЦОВ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА

Обоснована необходимость разработки средств технической диагностики технического состояния режущего инструмента без остановки комбайна. Показана возможность существенного снижения ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа при длительной работе проходческого комбайна с вышедшим из строя резцом. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что в качестве диагностируемого параметра отказов резцов может быть выбрано отношение первого и второго коэффициентов спектрального разложения тока двигателя привода резания исполнительного органа.

проходческий комбайн, исполнительный орган, резец, ресурс, трансмиссия, диагностика.

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.

Важнейшим условием интенсификации горных работ является повышение темпов проведения подготовительных выработок. Это возможно лишь с применением проходческих комбайнов с высокими показателями безотказности и долговечности. Одной из наиболее нагруженных подсистем комбайна является трансмиссия привода исполнительного органа. Ее нагруженность формируется в результате «внешнего» возмущения – системы сил резания горной породы на рабочем инструменте коронки. Очевидно, состояние режущего инструмента и, в первую очередь, поломки отдельных резцов, влияет на нагрузки в трансмиссии. Вместе с тем, поломка резца не приводит к отказу комбайна в целом и зачастую не может быть выявлена до остановки комбайна с визуальным осмотром исполнительного органа. Длительная работа проходческого комбайна с вышедшим из строя резцом может приводить к существенному снижению ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа. Поэтому необходима разработка средств технической диагностики технического состояния режущего инструмента без остановки комбайна.

Анализ исследований и публикаций. Известны разработки в области оценки и повышения ресурса элементов конструкции горных машин, основанные как на теоретических, так и на экспериментальных методах исследования. Так, в работе [1] предложены методы оценки индивидуального остаточного ресурса по факторам многоциклового усталости и износа на основе «модуля накопления данных» [2]. В работе [3] показано существенное

влияние ресурса проходческого комбайна на темпы проведения подготовительных выработок. Вместе с тем, отсутствуют исследования влияния поломок резцов на ресурс элементов трансмиссии исполнительных органов, оснащенных поперечно-осевыми коронками.

Постановка задачи. Целью работы является установление влияния выхода из строя резцов при работе проходческого комбайна на ресурс элементов трансмиссии исполнительного органа и обоснование диагностируемого параметра для выявления этих отказов.

Изложение материала и результаты.

Объектом, на котором выполнялись исследования, является проходческий комбайн КПД, оснащенный двумя поперечно-осевыми коронками диаметром 1000 мм. Для проведения исследований была использована разработанная авторами математическая модель рабочего процесса проходческого комбайна, учитывающая возможность поломок режущего инструмента.

Основными факторами, влияющими на характеристики рабочего процесса проходческого комбайна являются:

- характеристики разрушаемого забоя – сечение, структура, крепость породных слоев;
- параметры технического состояния комбайна;
- схема обработки забоя – последовательность режимов разрушения, вид режимов (боковой рез, вертикальная зарубка и т.д.) и их параметры (скорости подачи и вращения коронок, глубина зарубки и шаг фрезерования).

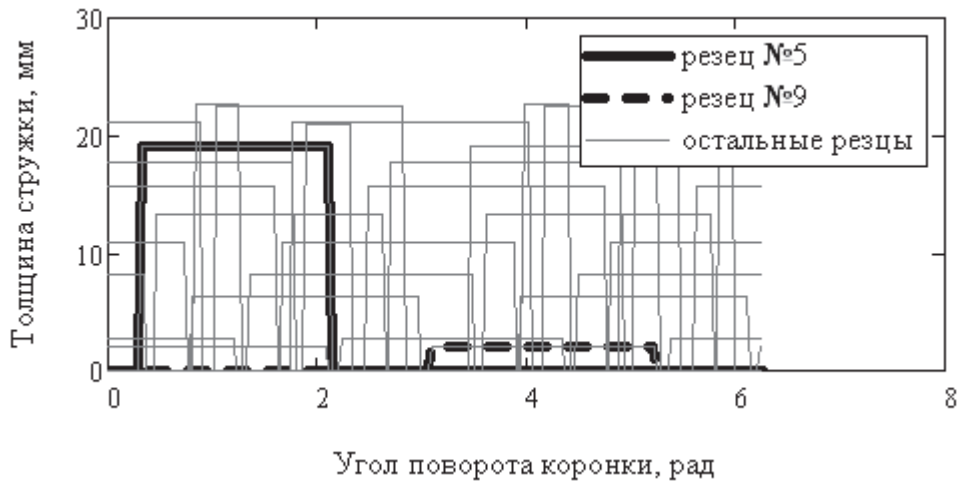
При реализации эксперимента необходимо оценивать статистические характеристики момента в трансмиссии, в том числе распределение вероятности, необходимое для расчета долговечности ее элементов по известным методикам. Так как при расчете распределений имеет значение только длительность отдельных режимов разрушения забоя и не важна их последовательность, последнюю следует исключить из числа факторов эксперимента.

Для модельных исследований были приняты представительные условия эксплуатации комбайна, а именно: забой состоит из 3-х пластов с одинаковыми долями по объему: порода кровли со средневзвешенной контактной прочностью $p_k = 400$ МПа, угольный пласт с сопротивляемостью резанию 250 Н/мм, порода почвы с $p_k = 800$ МПа. Приняты 3 варианта сечения выработки в проходке в соответствии с технической характеристикой комбайна – 11; 16 и 25 м².

Параметрами технического состояния комбайна приняты варианты схемы набора резцов на коронке, отличающиеся отсутствием резцов в различных линиях резания. Известно, что в различных режимах разрушения забоя на резцах поперечно-осевой коронки формируются существенно различные параметры среза. Так, на рис. 1 приведено изменение толщины среза на отдельных резцах за один оборот коронки в режиме бокового реза (а) и вертикальной зарубки (б) без учета динамики движения

исполнительного органа. Очевидно, поломка резца №5 более существенно скажется на формировании вектора внешнего возмущения в режиме бокового реза, а резца №9 – вертикальной зарубки. Поэтому планом вычислительного эксперимента следует предусмотреть оба возможных варианта.

а)



б)

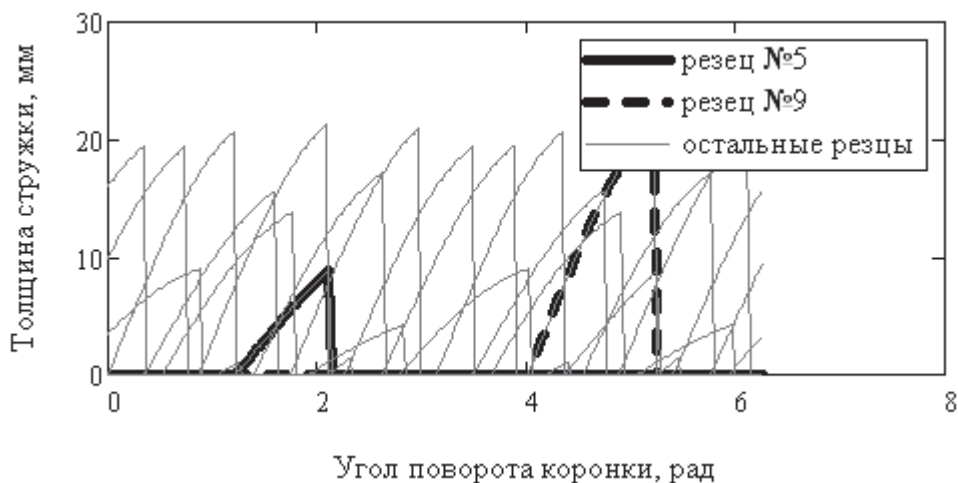


Рисунок 1 – Толщина стружки на резцах коронки при боковом резе (а) и вертикальной зарубке (б)

Таким образом, в качестве параметров технического состояния приняты схемы набора:

- с полным комплектом резцов;
- без резца №5 (существенно нагружен при боковом резе);
- без резца №7 (примерно одинаково нагружен при боковом резе и зарубке);

- без резца №9 (существенно нагружен при зарубке).

Кроме того, параметры реальной конструкции коронки ввиду погрешностей технологии изготовления отличаются от заданных схемой

набора. Эти отклонения были учтены в вычислительном эксперименте как дополнительный случайный фактор путем ввода в математическую модель случайных величин, моделирующих отклонения координат резцов.

Параметры режима разрушения забоя коронками – глубина зарубки B , шаг фрезерования ΔH , скорости подачи V_n и вращения ω существенно влияют на нагруженность исполнительного органа. Поэтому при планировании вычислительного эксперимента задавались различные значения B и ΔH (с учетом конструкции исполнительного органа), а значения скоростей подбирались с учетом физико-механических свойств породы для обеспечения максимальной производительности на основе рекомендаций работы [4].

В соответствии с разработанным планом был реализован вычислительный эксперимент. Как показали результаты моделирования, выход резца из строя приводит к значительному росту динамичности нагрузок (в качестве примера реализация момента для бокового реза приведена на рис. 2), при чем в первую очередь за счет увеличения неравномерности низкочастотной составляющей нагрузки (частота вращения коронки).

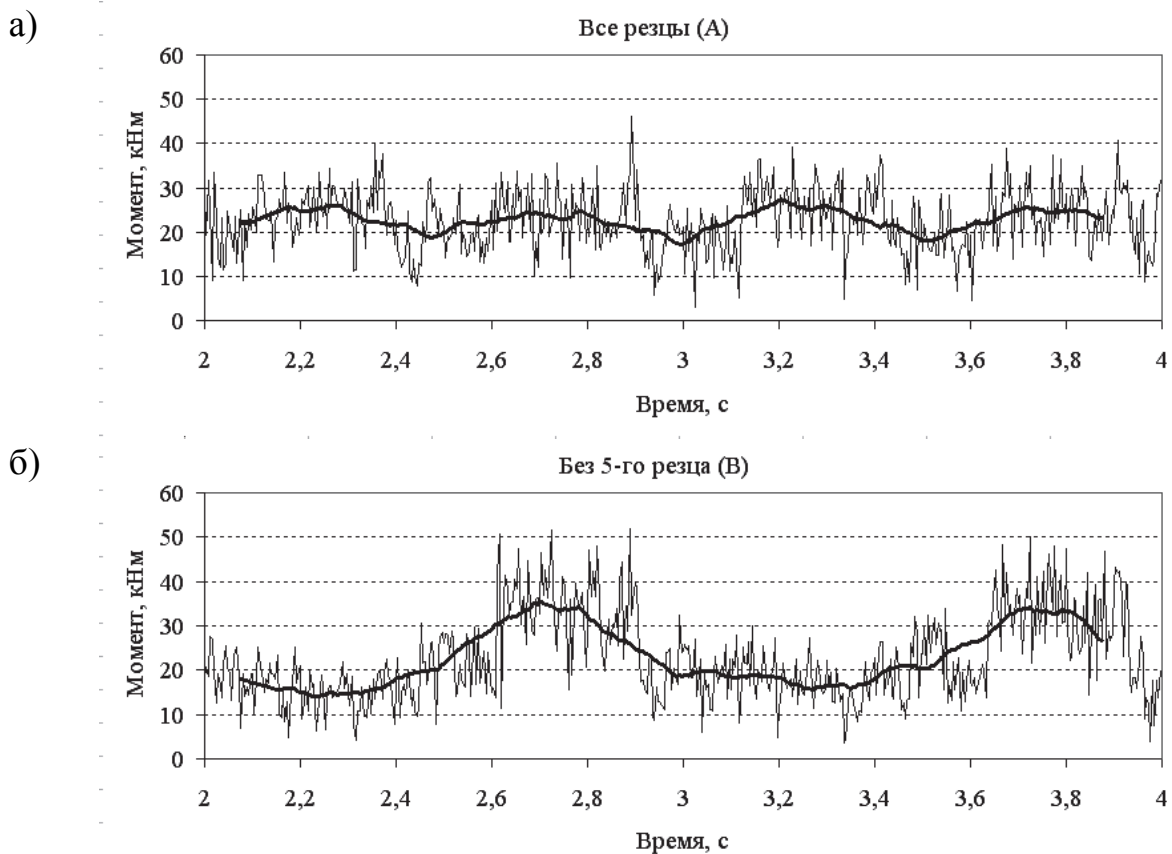


Рисунок 2 – Изменение момента в трансмиссии, приведенного к исполнительному органу, при боковом резе с полным комплектом резцов (а) и без 5-го резца (б)

Анализ гистограмм распределения вероятности момента в трансмиссии (рис. 3) показал, что поломка резца приводит к повышению вероятности максимальных и минимальных значений момента при некотором снижении вероятности средних значений. Это приводит к изменению накопленной повреждаемости в элементах трансмиссии и, соответственно, влияет на их ресурс.

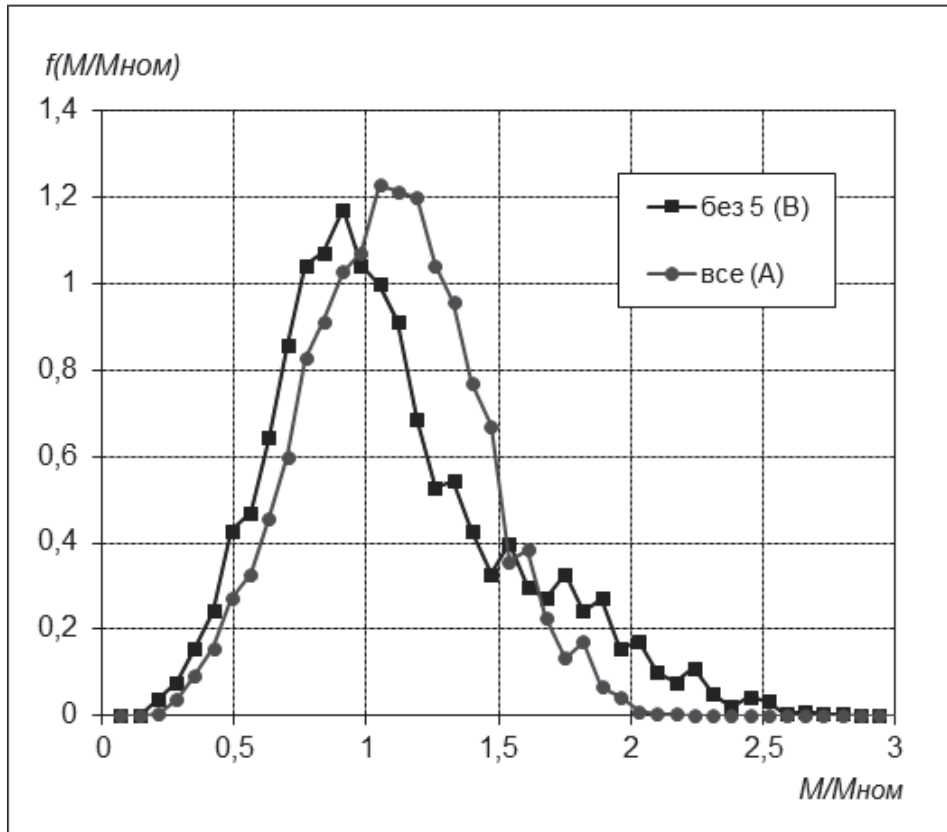


Рисунок 3 – Гистограмма распределения вероятности нормированного момента в трансмиссии при боковом резе коронкой с полным комплектом резцов (A) и при поломанном резце №5 (B)

Отличительной особенностью проходческого комбайна с исполнительным органом, оснащенный поперечно-осевыми коронками, является большое число режимов разрушения забоя. Как показано в работе [5] при уточненном расчете таких режимов может быть более 5-6. Однако, с точки зрения формирования нагруженности трансмиссии имеют значение лишь наиболее интенсивные режимы. При этом, например, фронтальная зарубка осуществляется в наиболее слабый пласт забоя (угольный) и при расчете может быть исключена. Вместе с тем, как показано в работе [6], если объемные доли разрушаемых пластов с контактными прочностями $p_{к1}$, $p_{к2}$ и $p_{к3}$ в забое составляют d_1 , d_2 и d_3 , то длительности разрушения i -го пласта составят (см. рис. 4):

в режиме бокового реза

$$t_{\text{б}pi} = \frac{60(S_{\text{ч}} - 2L_{\text{к}}H_{\text{ч}})d_i}{\Delta H_i V_{\text{н.б}pi}}, \quad i = 1..3;$$

в режиме вертикальной зарубки

$$t_{\text{взи}} = \frac{60H_{\text{ч}}d_i}{V_{\text{н.взи}}}, \quad i = 1..3,$$

где $S_{\text{ч}}$, $H_{\text{ч}}$ - площадь сечения и высота выработки в проходке;

$L_{\text{к}}$ - длина коронки;

$V_{\text{н.бпи}}$, $V_{\text{н.взи}}$ - скорость подачи коронки при боковом резе и вертикальной зарубке по i -му пласту;

ΔH_i - шаг фрезерования i -го пласта.

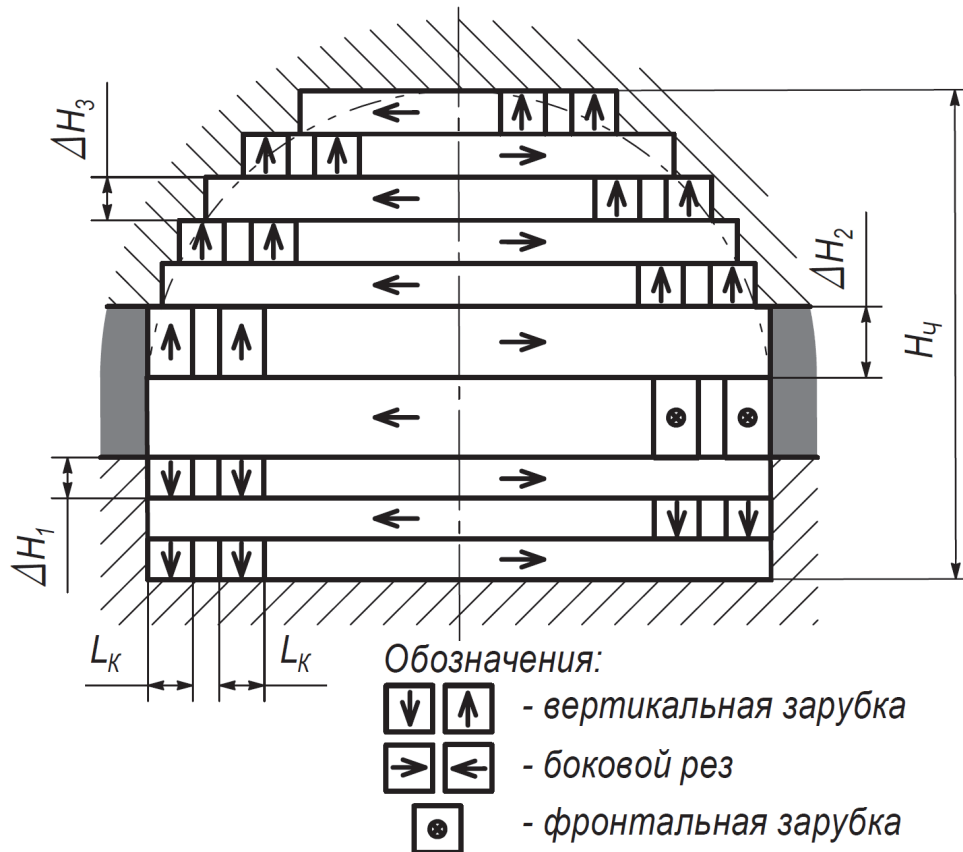


Рисунок 4 – Схема обработки забоя

Накопленная повреждаемость на 1 м проходки выработки

$$НП_L = \frac{\omega}{2\pi B} \sum_{i=1}^3 \left[t_{\text{бпи}} \int_0^{M_{\text{max}}} M^m f_{\text{бпи}}(M) dM + t_{\text{взи}} \int_0^{M_{\text{max}}} M^m f_{\text{взи}}(M) dM \right],$$

где ω , M - угловая скорость и передаваемый крутящий момент рассматриваемого элемента трансмиссии;

M_{max} - значение крутящего момента, соответствующее для рассматриваемого элемента трансмиссии пределу текучести;

m - показатель степени кривой усталости для рассматриваемого элемента;

$f_{\text{бpi}}(M)$, $f_{\text{вzi}}(M)$ - плотности вероятности крутящего момента в режимах бокового реза и вертикальной зарубки по i -му пласту.

Снижение ресурса элементов трансмиссии при постоянной работе с поломанным резцом по сравнению с работой с полным комплектом резцов оценивалось в процентах:

$$\delta T = 100 \frac{НП_L^{-1} - НП'_L^{-1}}{НП_L^{-1}},$$

где $НП_L$, $НП'_L$ - накопленные за метр проходки выработки повреждаемости при работе с полным комплектом резцов и с поломанным резцом соответственно.

В таблице 1 приведены результаты расчета снижения ресурса элементов трансмиссии комбайна КПД. Результаты зависят от номера поломанного резца, показателя степени кривой усталости и площади сечения забоя в проходке. Анализ полученных данных позволил сделать выводы:

а) работа с поломанными резцами может приводить к существенному снижению ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа комбайна – на величину до 60-70% для валов и зубчатых колес, до 22-25% для подшипников;

б) влияние поломки резца на ресурс элементов трансмиссии зависит от положения резца на коронке согласно схеме набора. Так, для резцов №5 и №7 эффект существенный, тогда как поломка резца №9 приводит к снижению ресурса не более чем на 10-12%

в) площадь сечения забоя не оказывает существенного влияния на относительное снижение ресурса.

Таблица 1 – Относительное снижение ресурса (%) элементов трансмиссии комбайна КПД при поломках различных резцов

Номер поломанного резца	Площадь сечения забоя в проходке, м ²		
	11	16	25
m=3			
5	25	26	27
7	22	23	23
9	2.7	2.5	2.3
m=6			
5	73	74	74
7	66	67	68
9	10	9,9	9,5
m=9			
5	92	92	92
7	91	91	91
9	12	12	11

Таким образом, для существующих проходческих комбайнов поломка резца не может быть выявлена до остановки машины. Длительная работа проходческого комбайна с вышедшим из строя резцом может приводить к существенному снижению ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа. Поэтому необходима разработка средств технической диагностики технического состояния режущего инструмента без остановки комбайна. Для этого необходимо обоснование диагностируемого параметра и его предельного состояния. Так как повышение неравномерности нагрузки происходит на достаточно низкой частоте (см. рис. 2), в качестве диагностируемого параметра могут быть приняты характеристики процесса изменения тока двигателя привода резания исполнительного органа. В пользу выбора тока двигателя также способствует сложность фиксации в производственных условиях альтернативных величин – виброускорений, сил и моментов. В качестве возможных характеристик процесса изменения (параметров) тока двигателя рассматривались: коэффициент неравномерности, коэффициент вариации, коэффициенты спектрального разложения.

Для обоснования используемого параметра был реализован полнофакторный вычислительный эксперимент согласно плану, приведенного в табл. 2.

Таблица 2 – Факторы эксперимента и их уровни

Фактор	Уровень фактора
Техническое состояние коронки	А – все резцы исправны В – отсутствует 5-й резец С – отсутствует 7-й резец D – отсутствует 9-й резец
Глубина зарубки B , м	0,2; 0,4
Шаг фрезерования ΔH , м	0,2; 0,4; 0,6; 0,8
Контактная прочность разрушаемой породы p_k , МПа	600; 1000

При диагностике поломок резцов в режиме реального времени длительный интервал наблюдений для расчета параметров тока двигателя с учетом неоднородного строения забоя, достаточно небольшой длительности отдельных резов и особенностей управления комбайном может быть неэффективен. Поэтому при исследованиях рассматривались фрагменты реализаций длительностью, соответствующей 1-3 оборотам коронки. Статистические характеристики, рассчитанные для столь коротких реализаций являются случайными величинами (см., в качестве примера, рис. 5). Поэтому в ходе вычислительного эксперимента осуществлялось многократное (до 1000 повторов) моделирование для каждого сочетания уровней факторов эксперимента с последующей статистической обработкой (расчет средних и гамма-процентных значений).

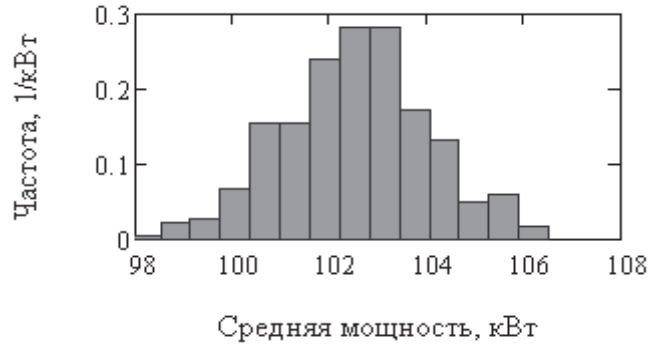


Рисунок 5 – Гистограмма распределения среднего значения мощности двигателя привода исполнительного органа в режиме бокового реза

Результаты вычислительного эксперимента показали, что в качестве диагностируемого параметра может быть выбрано k_{12} - отношение первого и второго коэффициентов спектрального разложения, отвечающее условиям воспроизводимости, чувствительности и однозначности. Остальные параметры не в полной мере удовлетворяют этим условиям. В качестве примера в табл. 3 приведены средние, минимальные и максимальные (с вероятностью 90%) значения k_{12} , полученные при различных параметрах режима разрушения породы контактной прочностью 600 МПа боковым резом. Анализ полученных результатов показал, что для всех схем разрушения, режимных параметров и крепостей пород в диапазоне до 1000 МПа параметр k_{12} при работе комбайна при наличии всех резцов на коронке с вероятностью 90% не превышает 1 (в табл. 3 наибольшее значение составляет $k_{12\max 90\%}=0,72$).

Таблица 3 – Результаты вычислительного эксперимента

Режим	B , мм	ΔH , мм	k_{12cp}	$k_{12\min 90\%}$	$k_{12\max 90\%}$
боковой рез, все резцы	200	400	0,20	0,07	0,35
	200	600	0,16	0,06	0,27
	200	800	0,18	0,06	0,31
	400	200	0,23	0,08	0,40
	400	400	0,26	0,10	0,45
	400	600	0,23	0,08	0,41
	400	800	0,40	0,14	0,72
боковой рез, без резца №5	200	400	2,12	1,75	2,51
	200	600	2,29	1,93	2,71
	200	800	2,64	2,16	3,17
	400	200	1,95	1,54	2,42
	400	400	3,28	2,37	4,32
	400	600	3,04	2,33	3,84
	400	800	5,20	3,49	6,73

В случае поломки какого-либо резца отношение k_{12} резко возрастает вследствие существенного увеличения неуравновешенности коронки и с вероятностью 90% составляет не менее чем 1 (в табл. 3 наименьшее значение составляет $k_{12 \min 90\%} = 1,54$). Таким образом, в качестве предельного значения диагностируемого параметра k_{12} следует принять 1. Для снижения вероятности ошибки выявления поломки резца в процессе работы комбайна анализируются несколько последовательно рассчитываемых в режиме реального времени значений k_{12} .

Для апробации предложенного метода диагностирования состояния режущего инструмента были использованы результаты шахтного эксперимента ГП «Донгипроуглемаш» при проходке комбайном КПД вентиляционного штрека северной коренной лавы пласта 112 АП «Шахта «Белицкая» ГП «Добропольеуголь» (площадь сечения в проходке 13 м^2) в 2008 г. В ходе эксперимента фиксировалось давление в гидроцилиндрах перемещения исполнительного органа и ток двигателя с шагом квантования $0,01 \text{ с}$ в процессе выполнения одного цикла обработки забоя. При этом одна из спаренных поперечно-осевых коронок (правая) имела поломанный резец, а вторая (левая) была оснащена полным комплектом резцов. Это позволило получить без монтажно-демонтажных работ закономерности процесса разрушения забоя как при всех исправных резцах, так и при отказе одного из резцов.

На рис. 6 представлены фрагменты синхронных записей изменения давления в поршневой $p_{ппов}$ и штоковой $p_{шпов}$ полостях гидроцилиндра поворота исполнительного органа и значения коэффициента k_{12} , рассчитанные в результате обработки записи тока двигателя при разрушении забоя исполнительным органом влево и вправо.

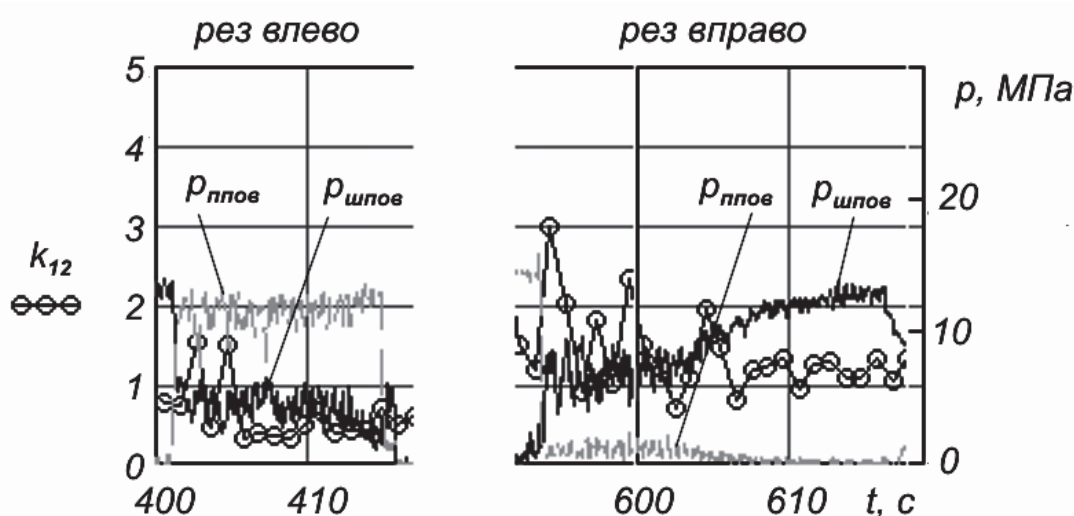


Рисунок 6 – Фрагмент изменения давления в полостях гидроцилиндров поворота исполнительного органа и рассчитанные значения коэффициента k_{12}

Анализ результатов эксперимента подтвердил правильность предложенной методики диагностирования отказов резцов на основе обработки регистрируемых значений тока двигателя в режиме реального времени. Также имеют место единичные «выбросы» значения k_{12} за граничное значение, что подтверждает необходимость использования нескольких (2-4) последовательных значений для однозначной диагностики.

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Необходима разработка средств диагностики технического состояния режущего инструмента на основании непрерывной регистрации тока двигателя привода резания исполнительного органа. Для существующих проходческих комбайнов поломка резца не может быть выявлена до остановки машины. Длительная работа проходческого комбайна с вышедшим из строя резцом может приводить к существенному снижению ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа – на величину до 60-70%.

2. В качестве диагностируемого параметра отказов резцов может быть выбрано отношение первого и второго коэффициентов спектрального разложения тока двигателя привода резания исполнительного органа k_{12} , отвечающее условиям воспроизводимости, чувствительности и однозначности. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что для всех схем разрушения, режимных параметров и крепостей пород условием отказа резца является $k_{12} > 1$. Для снижения вероятности ошибки выявления поломки резца в процессе работы комбайна следует анализировать несколько последовательно рассчитываемых в режиме реального времени значений k_{12} .

3. В дальнейшем необходимо обоснование эффективной стратегии замены изношенного инструмента, особенно при работе с присечкой крепких пород.

Библиографический список

1. Кондрахин В.П. Оценка остаточного ресурса горных машин / В.П. Кондрахин, Н.И. Стадник // Решение научно-технических проблем при создании и внедрении современного горно-шахтного оборудования: Зб. наук. праць. – Донецьк: ГП Донгіпроуглемаш, 2008. – Вип. 113. – С. 685–694.
2. Кудлай Р.А. Блок регистрации произошедших событий на проходческом комбайне / Р.А. Кудлай, А.В. Мезников, Н.И. Стадник // Решение научно-технических проблем при создании и внедрении современного горно-шахтного оборудования. – Донецьк, 2008. – С. 647–660.
3. Шабаев О.Е. Обоснование значений макроуровневых параметров проходческого комбайна / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, А.И. Хиценко // Уголь Украины. –2011. – № 5. – С. 49–52.
4. Шабаев О.Е. Адаптивная оптимизация цикла обработки и параметров режима разрушения забоя проходческим комбайном избирательного действия по критерию темпа

проходки / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. – Донецк, 2010. – Вып. 39. – С.210-219.

5. Семенченко А.К. Теоретические основы анализа и синтеза горных машин и процесса их восстановления как динамических систем / А.К. Семенченко, В.М. Кравченко, О.Е. Шабаев – Донецк: РВА ДонНТУ, 2002. – 302с.

6. Семенченко А.К. Оценка эффективности способов регулирования нагрузки на привод резания комбайна типа П110 в условиях Донбасса / А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко // Вісті Донецького гірничого ін-ту / Донецький національний технічний університет. – Донецьк, 2004. – №2. – С. 109-115.

Надійшла до редколегії 1.10.2013

**О.Є. Шабаєв, М.І. Стаднік, М.В. Хиценко, І.І. Бридун, А.В. Коваленко
ДІАГНОСТУВАННЯ ВІДМОВ РІЗЦІВ ПРОХІДНИЦЬКОГО КОМБАЙНА**

Обґрунтовано необхідність розробки засобів технічної діагностики технічного стану ріжучого інструменту без зупинки комбайна. Показана можливість істотного зниження ресурсу елементів трансмісії виконавчого органу при тривалій роботі прохідницького комбайна з різцем, що вийшов з ладу. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що в якості діагностичного параметра відмов різців може бути вибрано відношення першого та другого коефіцієнтів спектрального розкладання струму двигуна приводу різання виконавчого органу.

прохідницький комбайн, виконавчий орган, різець, ресурс, трансмісія, діагностика

**O. Shabayev, N. Stadnik, N. Khitsenko, I. Bridun, A. Kovalenko
DIAGNOSTICS OF CUTTING TOOLS' BREAKDOWNS OF HEADING MACHINE**

It is established the necessity of developing of technical diagnostic tools of the cutting tool's technical state without stopping the heading machine. It is shown the possibility of significant life time degradation of transmission components of heading machine's cutting unit during prolonged operation with broken cutting tool. The ratio of the first and second coefficients of the spectral decomposition of cutting unit drive's current is theoretically established and experimentally proved as diagnostic parameter for detecting the cutting tools failures.

heading machine, cutting unit, cutting tool, life time, transmission, diagnostic