Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. LXXXVII, 1981 г.

УДК 622.232.002.5

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАРАБОТКИ КОМБАЙНОВ

М.Д.КОЛОМИЙЦОВ

Мощность и производительность очистных комбайнов из года в год увеличиваются. Растут средний уровень P_1 и размах P_A колебания нагрузок, потребляемых приводом машины. По мере отработки пластов угля с наиболее благоприятными горно-геологическими условиями увеличивается сопротивляемость пластов разрушению A и содержание в них крепких включений и прослойков. Качество сталей и технология изготовления комбайнов улучшаются медленнее, чем возрастают нагрузки. Из-за ограничения призабойного пространства невозможно резко повысить прочность и надежность элементов приводов за счет увеличения их размеров. Специфические условия работы в забое снижают эффективность профилактических ремонтов и осмотров. Рост комплексно-механизированных лав опережает выпуск мощных узкозахватных комбайнов, поэтому в шахтах работает более половины машин, прошедших капитальный ремонт. Качество таких комбайнов ниже, чем новых, так как при капитальном ремонте используются детали, узлы и корпуса, не имеющие повреждений, но „накопившие" скрытые изменения структуры из-за усталостного характера нагрузок.

Особенности работы горных машин требуют прогнозирования их наработки (ресурса) в межремонтный период с учетом нагрузок при эксплуатации и качестве изготовления (ремонта). Высокая аварийность забойных машин (комбайнов, конвейеров) снижает эффективность работы комплексно-механизированных лав. Отсутствие резервных машин вызывает необходимость устранять поломки комбайнов в забое, что нерационально.

В Минуглепроме СССР принят метод определения межремонтных сроков работы комбайнов по объему добычи. Поскольку горно-геологические условия эксплуатации и качество каждого комбайна различны, этот метод, основанный на статистических данных, не позволяет достаточно точно оценить ресурс и наработку машины.

Предлагаемый метод прогнозирования наработки основан на усталостном характере разрушения элементов привода комбайнов и предполагает знание качества привода и функциональной зависимости средних и мгновенных нагру-

зок машины при эксплуатации от скорости подачи (технической производительности).

Методология исследования базируется на математическом описании трех взаимосвязанных физических явлений, происходящих в приводе комбайна при его работе: I) зависимости ресурса T_P от потерь мощности ΔP и энергоресурса привода K_K - количества энергии, которое может рассеять система (привод) при усталостном характере разрушения до выхода из строя наиболее слабого звена; 2) зависимости потерь мощности в приводе (или его КПД) от полезной нагрузки P_2 ; 3) зависимости мощности P_2 , потребляемой комбайном при эксплуатации, от технической производительности машины - скорости подачи $V_П$.

С увеличением $V_П$ увеличиваются потери мощности ΔP в его элементах и снижается ресурс машины в часах T_P . Однако наработка комбайна в тоннах в межремонтный период будет иметь экстремальное значение при определенной скорости подачи:

$$Q = 60 K_Л T_P V_П ; \qquad (I)$$

$$K_Л = B_Л m_Л \gamma , \qquad (2)$$

где $K_Л$ - производительность метра лавы; $B_Л$ - ширина захвата комбайна, м; $m_Л$ - вынимаемая мощность пласта, м; γ - объемный вес разрушаемого угля в целике, т/м^3.

Динамический характер нагрузки комбайнов вызывает усталостное разрушение его элементов и аварийный выход из строя деталей (рис.I). Физическая сущность усталостного разрушения твердых тел связана с механическими свойствами кристаллов. Работы физиков по изучению механических свойств твердых тел выявили явление упругого последействия, которое заключается в том, что результат воздействия данной силы на тело сказывается не весь сразу. Исследования показывали [2], что под действием постоянной силы изгиб, круче-

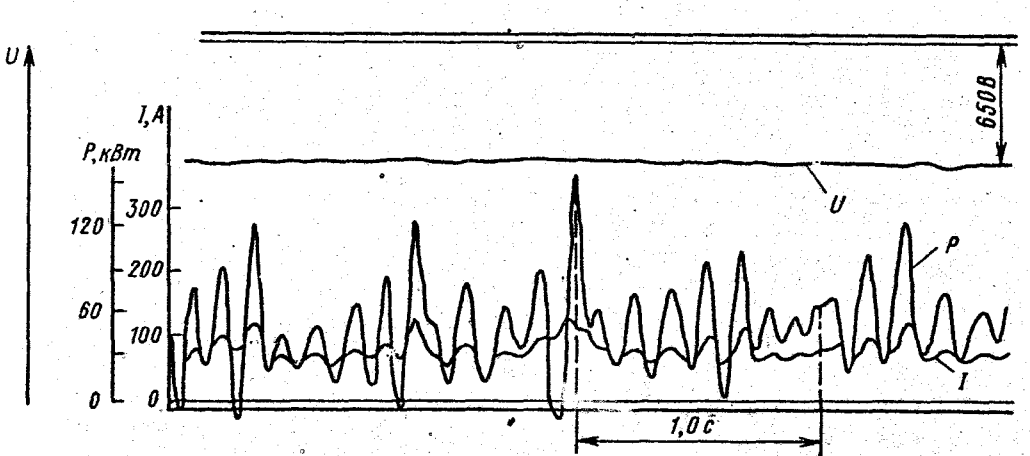


Рис.1. Мгновенные значения активной мощности P, тока I и напряжения U привода комбайна КШ-3М при работе на шахте „Полысаевская"

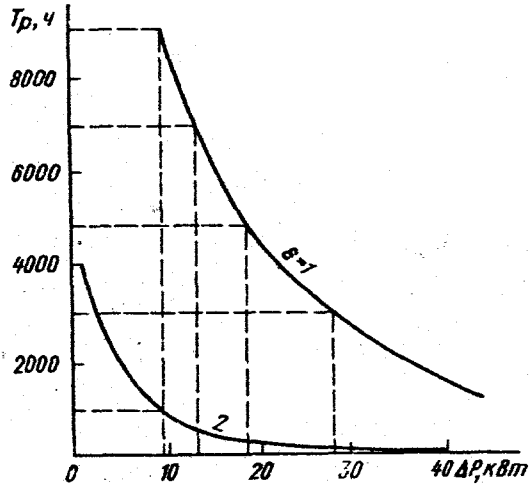


Рис.2. Зависимость ресурса комбайна КШ-1КГ от потерь мощности

ние, растяжение еще долгое время продолжается, постепенно ослабевая. Точные приборы могут отметить медленный ход даже через несколько месяцев. Когда сила перестает действовать, тело не сразу принимает прежний вид. От каждого воздействия остается, таким образом, след, который можно заметить долгое время спустя после исчезновения вызвавшей его причины. Имеет место нечто вроде памяти в теле о том, что оно испытало в прошлом.

Исходя из энергетического подхода к оценке прочности деталей машин, сделаем предположение, что при преобразовании энергии в приводе (при прохождении энергии через „валопривод" - двигатель и редуктор), где часть энергии теряется, наработка (ресурс) элементов „валопривода" (при равнопрочности элементов привода) будет определяться из выражения

$$T_P = K_K / \Delta P^{\varepsilon}, \qquad (3)$$

где ε - коэффициент, характеризующий материал и технологию изготовления элементов привода, а также средний уровень и неравномерность нагрузки, $\varepsilon \geq 1$; при нагрузках, не превышающих номинальные, $\varepsilon \approx 1$ (рис.2).

Экспериментальные данные показывают, что энергоресурс нового привода резания комбайна КШ-1КГ составляет 90000 кВт·ч. При номинальной нагрузке P_2 = 70 кВт средние потери мощности ΔP = 30 кВт. Если машина работает без перегрузок, ε = 1. Тогда из выражения (3) следует, что T_P = 3000 ч, что соответствует нормативному показателю, установленному в отрасли для комбайнов этого типа.

Величина K_K не зависит от величины и характера нагрузки и определяется кинематической схемой, конструкцией и технологией изготовления машины (привода, установки). Энергоресурс - суммарное, предельное количество энергии, потерянное (рассеянное) в машине при нормальной эксплуатации, после чего машина (привод) перестает нориально функционировать (теряет свой ресурс). Величина

$$K_K = \sum_{i=1}^{n} K_{K_i}, \qquad (4)$$

где n - число элементов в машине (приводе); K_{K_i} - предельное количество энергии, которое может рассеять i-й элемент машины (энергоресурс элемента), K_{K_i} зависит от материала, геометрических размеров, определяющих концентрацию напряжений, и технологии изготовления элемента привода.

По аналогии с выражением (3) текущее значение энергии, рассеянной в приводе за время t,

$$K_t = t \, \Delta P^{\varepsilon},$$

оно изменяется от нуля до K_K.

Если все элементы привода имеют равный ресурс (машина равнопрочна), то

$$T_{P_i} = T_{P_{i+1}} = T_P = \frac{K_K}{\Delta P^{\varepsilon}} = \frac{K_{K_{i+1}}}{(\Delta P_{1+i})^{\varepsilon}} = \frac{K_{Ki}}{\Delta P_i^{\varepsilon}} . \qquad (5)$$

Следовательно, если привод комбайна должен быть равнопрочным, то при проектировании, ремонте и эксплуатации машины необходимо знать потери мощности $\Delta P_i = f(P_2)$ в основных элементах и энергоресурс K_{K_i} (например, двигателя, основного и поворотных редукторов комбайна). Значения K_K и K_{K_i} должны определяться экспериментально.

Регистрируя, например, с помощью приборов регистратор-хронометражист (РХ), созданных в ЛГИ [3], расход энергии и время работы комбайна в лаве в межремонтный период, с разными уровнями нагрузок, можно фиксировать K_t и определить K_K, если для данного комбайна известна зависимость $\Delta P = f(P_2)$, т.е. функциональная связь потерь мощности и нагрузки.

Одним из основных показателей качества машин и механизмов является КПД, который оценивает потери мощности в системе. Вопросу изучения КПД редукторов (зубчатых передач) и двигателей уделяют большое внимание машиностроительные и научные организации [1, 9]. Однако в проводимых исследованиях влияние динамических нагрузок на потери мощности в двигателях и редукторах (приводах) практически не рассматривается. В ЛГИ такие работы проводятся около десяти лет.

С 1973 г. на стенде ремонтно-механического завода „Красный Октябрь" (Кузбасс) проходят приемо-сдаточные испытания привода резания (двигателей и редукторов) комбайнов КШ-1КГ после капитального ремонта. Стенд и методика испытаний разработаны в ЛГИ. На аналогичном стенде в институте проводятся исследования по совершенствованию метода оценки качества привода комбайна при динамической нагрузке. Разработаны численные показатели качества приводов резания комбайнов КШ-1КГ (по результатам испытаний более 300 машин). Суть метода заключается в следующем. С помощью двух генераторов постоянного тока и тиристорных преобразователей на выводные (шнековые) валы комбайна подается нагрузка. Замеряя потребляемую комбайном мощность P_1 и отдаваемую тиристорами в сеть $P_Г$, определяем потери мощности в испытываемом приводе:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_1 - P_Г - \Delta P_{СТ} , \qquad (6)$$

где $\Delta P_{СТ}$ - потери мощности в нагрузочных машинах стенда, определяемые при его тарировке, кВт.

Анализ результатов испытаний показывает, что при статической и динамической нагрузках потери мощности в функции нагрузки с достаточной степенью точности можно выразить уравнением прямой [4, 5]

$$\Delta P = P_X + a P_2 , \qquad (7)$$

где P_X, - потери холостого хода в испытываемом приводе, кВт; a - интен-

сивность роста потерь мощности с увеличением нагрузки, $a = a_C + a_Д$; a_C и $a_Д$ – интенсивность роста потерь мощности соответственно при статической нагрузке и от динамической составляющей нагрузки.

На заводе „Красный Октябрь" были испытаны 200 приводов комбайнов КШ-1КГ [6] для определения численных показателей их качества (рис.3). Средние значения $\bar{a}_C = 0,393$ с доверительными границами $a_C = 0,379–0,407$ при степени надежности 99 %. При той же степени надежности $\bar{P}_X = 8,4$ кВт, доверительные границы $P_X = 7,93–8,87$ кВт.

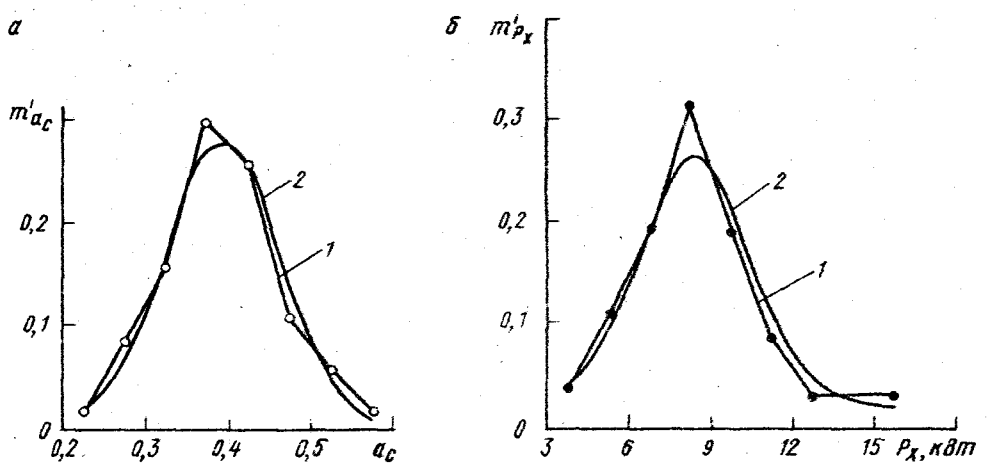


Рис.3. Полигоны распределения интенсивности роста потерь мощности от нагрузки (а) и холостого хода (б) для комбайнов КШ-1КГ
1 – фактические значения; 2 – выравненные значения

Потери холостого хода зависят от кинематики привода, состояния подшипников, качества смазки и точности обработки деталей, которая определяет состояние трущихся поверхностей.

Значение a зависит от переменных потерь в исследуемом приводе, которые характеризуют, главным образом, точность изготовления (сборки) деталей и узлов, т.е. геометрические параметры исследуемой системы:

$$a = a_C + a_Д = a_C + K_A K_V V_П , \qquad (8)$$

где $a_Д = K_A P_A$; K_A – интенсивность роста потерь мощности в приводе с увеличением P_A, I/кВт; K_V – размах колебаний мощности, потребляемой комбайном, на единицу скорости подачи, кВт·мин/м.

С увеличением неравномерности нагрузки потери мощности в приводе увеличиваются пропорционально K_A. Чем выше контактная прочность и жесткость элементов привода, тем меньше K_A. С ростом люфтов значение K_A растет, если при динамической нагрузке происходит раскрытие зазоров в исследуемой системе.

С ростом $V_П$ неравномерность нагрузки увеличивается пропорционально K_V:

$$P_A = K_V V_П .$$

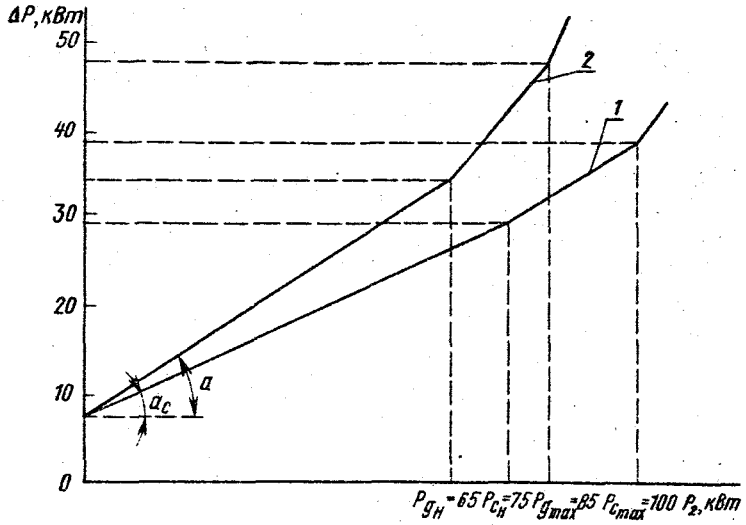


Рис.4. Зависимость потерь мощности от нагрузки для приводов резания комбайнов КШ-1КГ:
1- статическое нагружение; 2 - динамическое нагружение

На рис.4 представлены типичные зависимости потерь мощности от нагрузки для приводов резания комбайнов КШ-1КГ. При статическом характере нагружения потери мощности в приводе растут практически линейно до номинальной нагрузки $P_{cн}$ = = 75 кВт. При нагрузках до 100 кВт потери растут несколько интенсивнее и затем начинают возрастать очень быстро. Следовательно, работа при статической нагрузке свыше 100 кВт для этих приводов нежелательна. При динамической нагрузке (см.рис.1) потери изменяются по кривой 2 (рис.4). Кривая 2 построена при коэффициенте неравномерности нагрузки $K_н = P_A / P_2 = 0,65$ и основных частотах колебания полезной нагрузки $f = 0,5; 2,0; 8$ Гц. Эти нагрузки, как показывают шахтные испытания комбайнов, являются достаточно типичными для комбайнов КШ-1КГ. Стендовые испытания свидетельствуют, что изменение основных частот колебания нагрузки комбайнов до 12-15 Гц (практически при эксплуатации машин большие частоты составляют незначительный процент) мало сказывается на потерях мощности в приводе. Сопоставляя результаты стендовых исследований приводов резания комбайнов (в процессе их приемо-сдаточных испытаний после ремонта на заводе „Красный Октябрь") со среднестатистическими данными (см. рис.4), можно количественно оценить степень надежности конкретного комбайна и дать рекомендации о допустимых средних $P_н$ и максимальных P_{max} нагрузках при эксплуатации.

Известно, что средняя величина мощности, потребляемой комбайном при эксплуатации P_1, изменяется с ростом скорости подачи $V_п$ по линейному закону (при нагрузках, не превышающих максимальные)

$$P_1 = A + BV_п . \qquad (9)$$

где A и B - коэффициенты энергетической характеристики.

Уравнение (9) называется энергетической характеристикой машины и определяется экспериментально, измерением в лаве мощности, потребляемой комбайном при разной скорости подачи. ЛГИ проводит такие испытания комбайнов в разных бассейнах страны. Коэффициенты A и B энергетической характеристики комбайна могут быть определены расчетом [7]. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывает, что расхождение между ними составляет обычно 20-30 %.

В уравнении (9) коэффициент A характеризует суммарные потери мощности в момент внедрения резцов (вращающихся со шнеком со скоростью резания) в разрушаемый забой под действием скорости подачи (мощность, затрачиваемая комбайном в момент трогания машины):

$$A = P_X + P_{TP} + a P_{TP} , \qquad (10)$$

где P_{TP} - мощность, затрачиваемая на трение вращающихся резцов, прижимаемых к забою с силой, необходимой для его упругой деформации, кВт; $P_X + a P_{TP}$ определяют потери мощности в приводе.

Для узкозахватных двухшнековых комбайнов $P_X \approx P_{TP}$, тогда

$$A = P_X(2+a) . \qquad (11)$$

В уравнении (9) коэффициент B характеризует интенсивность роста потребляемой комбайном мощности с увеличением скорости подачи:

$$B = \frac{P_1 - A}{V_П} = \frac{P_P + a P_P}{V_П} = B'(1+a) , \qquad (12)$$

где B' - интенсивность роста среднего значения мощности резания P_P с увеличением скорости подачи, $B' = P_P / V_П$. Решая совместно уравнения (7)-(11), получим

$$\Delta P = P_X(1+a_C) + (P_X K_A K_V + a_C B')V_П + K_A K_V B' V_П^2 . \qquad (13)$$

Тогда при работе комбайна в нормальном режиме, без перегрузок ($\varepsilon = 1$), с учетом уравнений (1), (3) и (12) наработка машины в межремонтный период может быть определена по формуле

$$Q = \frac{60 K_Л K_К V_П}{P_X(1+a_C) + (P_X K_A K_V + a_C B')V_П + K_A K_V B' V_П^2} . \qquad (14)$$

Графическая интерпретация уравнения (14) представлена на рис.5, который характеризует возможную наработку комбайна КШ-1КГ в условиях пласта Бреевский шахты им.С.М.Кирова (Кузбасс, Ленинск-Кузнецкий), где силами ЛГИ проводились измерения мощности комбайна в функции скорости подачи.

Как видно из рис.5 и зависимости (14), наработка комбайна в межремонтный период достигает максимума при скорости подачи $V_{П опт}$. Значение оптимальной скорости подачи и максимальное значение наработки определяются из первой производной Q по $V_П$:

$$V_{П опт} = \sqrt{\frac{P_X(a_C+1)}{K_A K_V B'}} . \qquad (15)$$

Максимальная наработка, соответствующая этой скорости подачи,

$$Q_{max} = \frac{K_Л K_К}{2\sqrt{P_X(a_C+1)K_V K_A B'} + K_V K_A P_X + B' a_C} . \qquad (16)$$

Таким образом, для решения поставленной задачи - прогнозирования наработки комбайна в межремонтный период - необходимо обеспечить комплекс

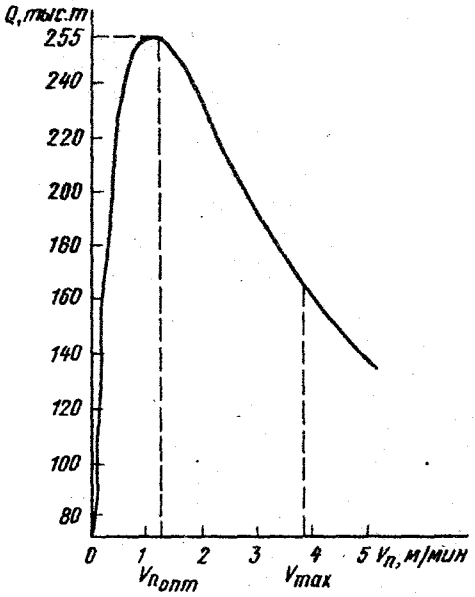


Рис.5. Зависимость наработки в функции скорости подачи для комбайна КШ-1КГ

технических мероприятий для определения и контроля семи параметров уравнения (14).

На стендах в процессе приемо-сдаточных испытаний определяют показатели качества (надежности) работы комбайна P_X a_C, K_A.

В первые смены работы комбайна в лаве (после первой посадки лавы) экспериментально устанавливают среднюю энергетическую характеристику B' и среднее значение размаха колебания мощности K_Y в функции скорости подачи. В случае невозможности проведения испытания эти величины можно определить расчетным способом по методикам отраслевых стандартов Минуглепрома СССР.

Зная вынимаемую мощность пласта m_Λ, ширину захвата комбайна B_Λ и объемный вес разрушаемой горной породы γ, по уравнению (2) находят K_Λ.

Энергоресурс привода комбайна K_K для определенного типа машины, при соблюдении технологических норм ее изготовления, является величиной постоянной. Так, среднестатистическое значение энергоресурса редуктора серийного комбайна КШ-1КГ составляет 90000 кВт·ч. В настоящее время отсутствуют данные о фактических энергоресурсах приводов (редукторов и двигателей) серийных и вновь выпускаемых машин. Для комбайнов энергоресурс привода может быть определен в процессе их эксплуатации с помощью приборов РХ, разработанных в ЛГИ и испытываемых с 1977 г. на шахтах Воркутинского и Кузнецкого бассейнов.

Приборы типа РХ предназначены для длительной непрерывной регистрации времени работы комбайна с тремя (РХ-2) или пятью (РХ-5) уровнями нагрузки. Приборы регистрируют также общий расход активной энергии W. РХ может эксплуатироваться в шахтах, опасных по газу и пыли, путем последовательного подключения в силовой кабель комбайна (горной машины) мощностью от 50 до 350 кВт. Прибор устанавливается на штреке под лавой. Все элементы прибора состоят из серийных устройств. Счетчики времени прибора регистрируют общее время включения машины t ; время работы машины с холостыми нагрузками t_X ; время работы машины с номинальными нагрузками t_H; время работы с нагрузками, превышающими номинальные до $P_{max} = 1{,}3\text{-}1{,}5 P_H$ (время работы с допустимыми перегрузками), $t_П$; время работы с перегрузками, превышающими допустимые, $t_П$. Пределы настройки пороговых устройств счетчиков времени позволяют в широких пределах регулировать уровни нагрузок, при которых происходит включение счетчиков. За номинальную нагрузку принимают мощность P_H (см. рис.4), при которой обеспечивается линейная зависимость потерь мощности от нагрузки. Значение P_H определяется в про-

цессе стендовых испытаний комбайнов. Обычно эта величина соответствует паспортному значению длительной мощности комбайнового двигателя. Значение P_{max} также определяется при стендовых испытаниях и характеризует мощность, при которой ее потери увеличиваются более интенсивно, чем при номинальной нагрузке, но достаточно плавно (рис.4). Если комбайн работает без недопустимых перегрузок и холостых включений (t_x и $t_п$ малы), то текущее значение энергии, рассеянное в исследуемом приводе (текущее значение энергоресурса),

$$K_t = \frac{t P_x}{1+a} + \frac{a}{a+1} W . \qquad (17)$$

Метод определения K_t с учетом работы комбайна с перегрузками и холостыми маневрами, а также вывод формулы (17) дан в литературе [8].

С помощью приборов РХ обеспечивается контроль за эффективностью эксплуатации комбайна. Непрерывно регистрируются КПД η , коэффициент использования машины во времени $K_в$, коэффициент рационального использования машины во времени (время работы комбайна с эффективной нагрузкой) $K_э = t_д / t$.

Предлагаемая методика прогнозирования наработки или ресурса комбайнов справедлива для всех горных машин (экскаваторов, буровых станков, погрузочных машин), имеющих динамическую нагрузку при эксплуатации. Рассматриваемый способ позволяет оценить ресурс любого привода (двигателя, редуктора), если можно определить функциональную связь потерь мощности (КПД) привода от нагрузки, а нагрузки - от производительности. Вводимое понятие „энергоресурс" присуще любой системе, преобразующей и передающей энергию. Совершенствование метода его определения является задачей дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов. М., Наука, 1965.

2. Иоффе А.Ф. О физиках и физике. Л., Наука, 1977.

3. Коломийцов М.Д. Метод оценки эффективности обслуживания и качества ремонта ГШО. В кн.: Совершенствование использования, технического обслуживания и ремонта горношахтного оборудования в отрасли с применением ЭВМ. Тезисы докладов. М., изд.ЦНИЭИуголь, 1979.

4. Коломийцов М.Д. Стенд для испытания комбайнов. Горные машины и автоматика, 1971, № 3.

5. Коломийцов М.Д., Габов В.В. Зависимость наработки добычных комбайнов от величины и характера нагрузки. - Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1977, № 2.

6. Коломийцов М.Д., Нгуен Фам Тхык. Численные показатели качества комбайнов. - Угольное машиностроение, 1979, № 8 (32).

7. ОСТ 12.47.001-73. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. Взамен ОСТ 24.070.08. Введен 01.05.1974.

8. Разработка методики и создание стенда для испытаний после ремонта комбайнов для условий комбината „Воркутауголь": Отчет х/д 743 / ЛГИ. Руководитель работы М.Д.Коломийцев. № ГР 71048662. Л., 1975.

9. Соловьев А.И. КПД механизмов и машин. М., Машиностроение, 1986.