

1st International Conference - Reliability and Durability
of Machines and Machinery Systems in Mining
1986 JUNE 16-18 SZCZYRK, POLAND

Михаил Дмитриевич КОЛОМИЙЦОВ

Горный институт
Ленинград, СССР

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА КОМБАЙНА

Резюме. В работе обосновано новое методологическое направление расчета ресурса машин (на примере привода комбайна), с учетом численных показателей ее качества, условий эксплуатации и режима нагружения. Разработан алгоритм, устанавливающий связь ресурса комбайна с восьмью показателями, характеризующими систему "забой-комбайн". Установлено новое физическое свойство машины (приводов, деталей) – энергоресурс – предельное количество энергии, которое может рассеять в виде потерь машины до отработки ресурса. Энергоресурс не зависит от нагрузки и определяется конструкцией машины (привода) и технологией изготовления. Разработан и внедрен новый метод определения показателей качества сборки и изготовления комбайнов – по потерям мощности в функции нагрузки. Функция определяется на стенде в процессе приемо-сдаточных испытаний собранного на заводе комбайна. С помощью симплексного метода исследованы факторы, определяющие точность прогнозирования ресурса по данному методу, доведенному до инженерного расчета.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность горной техники недостаточна. Объясняется это несоответствием между фактическими нагрузками комбайнов и их допустимыми значениями.

Цель данного исследования – разработать инженерный метод численной оценки ресурса горных машин на примере серийного комбайна типа КШ-1КГ.

Методика решения поставленной цели основывается на введении нового физического понятия "энергоресурс" (K_k , кДж) комбайна (привода, механизма, детали). Энергоресурс – это количество энергии, которое может рассеять привод резания (двигатель и редуктор) комбайна (любой механизм, преобразующий энергию) до наступления его предельного состояния. Энергоресурс – объективно существующее свойство любого привода, характеризуемого конструкцией, материалом, технологией изготовления, режимом взаимодействия элементов (относительной скоростью деталей, смазкой, характером переходных процессов).

Энергоресурс (K_k) не зависит от нагрузки, если ее величина и характер не превышают допустимого предела, равен суммарным потерям мощности (ΔP) в при-

воде за время отработки ресурса T_p

$$K_k = T_p \cdot \Delta P, \text{ кДж} \quad (1)$$

С увеличением нагрузки растет ΔP и снижается T_p при данном K_k . Зная ΔP в функции величины и характера нагрузки и качества привода, определяем его ресурс.

Средние значения потребляемой приводом резания комбайна мощности (P_I) и среднеквадратичное отклонение (σ_x) определяются по их энергетическим и динамическим характеристикам.

$$P_I = A + B \cdot v_n, \text{ кВт} \quad (2)$$

$$\sigma_x = K_v \cdot v_n, \text{ кВт} \quad (3)$$

Коэффициенты энергетической (A и B) и динамической (K_v) характеристик комбайнов определяются экспериментально на работающей машине или расчетом [1]. Мощность, потребляемая комбайном в момент упругого внедрения резцов в разрушающий забой

$$A = A_{tp} + P_x + a_c A_{tp} \quad (4)$$

где A_{tp} , кВт – мощность трения резцов, прижатых к углю с силой упругой деформации (в начальный момент внедрения); P_x , кВт – потери холостого хода привода резания комбайна; a_c – интенсивность роста потерь мощности в приводе резания с увеличением нагрузки (в данном случае A_{tp}). P_x и a_c – показатели качества привода, характеризуют точность сборки и изготовления и определяются экспериментально на стенде в процессе приемо-сдаточных испытаний комбайна [2]. На основании экспериментальных данных (полученных для комбайна типа КШ-1КГ) $P_x \approx A_{tp}$. Тогда,

$$A = P_x + a_c, \text{ кВт} \quad (5)$$

Величина B характеризует удельную мощность (на единицу скорости подачи v_n), т.е. интенсивность роста мощности, потребляемой комбайном P_I от скорости подачи.

$$B = B^1 (1 + a_c), \text{ кДж/м}, \quad (6)$$

где B^1 – удельная средняя мощность, затрачиваемая комбайном на разрушение угля. Значения B и B^1 определяются экспериментально или расчетом.

Удельное значение среднеквадратичного отклонения мощности K_v , кДж/м характеризует динамичность нагрузки и определяется экспериментально по осцилограммам нагрузок комбайна.

Зависимость потерь мощности ΔP от показателей качества привода и его нагрузки

$$\Delta P = P_x + (a_c + a_g) P_2, \text{ кВт}, \quad (7)$$

где

P_2 – полезная средняя мощность комбайна,

a_g – интенсивность роста потерь мощности в приводе комбайна от динамической составляющей нагрузки G_x . Выражение (7) получено в ЛГИ на стенде, где испытывается под нагрузкой комбайн типа КШ-ИКГ.

$$a_g = K_a \cdot G_x = K_a K_v V_{\pi}, \quad (8)$$

где K_a , $I/\text{kВт}$ – удельная интенсивность роста потерь мощности от среднеквадратичного отклонения нагрузки.

K_a – характеризует качество привода, его жесткость и определяется экспериментально на стенде. Методика испытаний и стенды разработаны и функционируют на заводе "Краонный Октябрь" в Кузбассе и в ЛГИ [2]. Соотношение между P_x и a_c установлено для приводов резания комбайнов КШ-ИКГ по данным испытаний около 500 машин на заводе "Красный Октябрь". На заводе проходят капитальный ремонт все комбайны, работающие на шахтах Кузбасса. После сборки ОТК завода проверяет их качество по методике ЛГИ на испытательных стендах, определяя потери мощности в функции средней нагрузки. С достаточной степенью точности

$$a_c = a_o - b P_x \quad (9)$$

Соотношение (9) позволяет в шахте, на работающем комбайне определять ΔP и a_c по значению P_x , которое легко контролируется.

Решая совместно уравнения (2), (6), (8) и учитывая, что $P_1 = P_2 + a_c P_2 = P_2 (1 + a_c)$, получим

$$\Delta P = P_x (1 + a_c) + (P_x K_v K_A + a_c B') V_{\pi} + B' K_A K_v V_{\pi}^2, \text{ кВт} \quad (10)$$

Прогнозируемый ресурс привода резания комбайна в тоинах

$$Q = 3600 T_p \cdot K_d \cdot V_{\pi}, \text{ т} \quad (11)$$

где $K_d = B_{\pi} \cdot \eta_{\pi} \cdot \gamma$, $\text{т}/\text{м}$ – производительность метра лавы; B_{π} – ширина захвата; η_{π} – мощность пласта; γ – плотность угля в целике; T_p – ресурс в часах.

С учетом (1), (10) и (11)

$$Q = \frac{3600 K_d K_{\pi} V_{\pi}}{P_x (1 + a_c) + (P_x K_v K_A + a_c B') V_{\pi} + B' K_A K_v V_{\pi}^2}, \text{ т} \quad (12)$$

Максимальное значение ресурса определим, приравняв нулю первую производную от выражения (12)

$$Q_{\max} = \frac{K_p K_x}{2 \sqrt{P_x (1+a_c) K_v K_A B^2 + K_v K_A P_x + B^2 a_c}}, \quad (13)$$

Q_{\max} достигается при

$$v_{\text{опт.}} = \sqrt{\frac{P_x (1+a_c)}{K_A K_v B^2}}, \quad \text{м/с} \quad (14)$$

Таким образом, для поставленной в работе цели – прогнозирования ресурса комбайна в межремонтный период с учетом показателей его качества (K_p, P_x, a_c, K_A), режима (K_v, B^2) и условий работы (K_d) необходимо обеспечить комплекс технических мероприятий для определения и контроля семи параметров уравнений (12–14).

В настоящее время отсутствуют статистические данные об энергоресурсе комбайнов. Энергоресурс можно определять по относительной величине – удельному энергоресурсу

$$H_K = \frac{Q}{E_K}, \quad \text{T/кДж} \quad (15)$$

С учетом выражений (1) и (11)

$$H_K = \frac{V \cdot K_d}{\Delta P}, \quad \text{T/кДж} \quad (16)$$

В выражении (16) все величины легко определяются и контролируются. H_K – интегральный показатель качества и режима работы комбайна. Чем выше H_K , тем лучше используется комбайн. Для большинства комбайнов сложно установить закон распределения фактического ресурса, так как разнятся условия, режим эксплуатации и качество машин. Поэтому невозможно прогнозировать ресурс комбайнов методами теории надежности. Регистрируя, за весь период эксплуатации, время работы комбайна с различными уровнями нагрузок, можно определить ресурс в часах (T) и тоннах (Q), а, значит, и энергоресурс K_p . Такие приборы выпускаются Минуглепромом СССР.

Все представленные зависимости получены в детерминированном виде и основаны на сопоставлении математических ожиданий (средних значений) семи основных параметров системы "забой-комбайн". Эти параметры – случайные величины. Они изменяются по нормальному закону, так как зависят от многих равнозначных случайных явлений. Совокупная количественная характеристика, позволяющая определить численные значения ресурса при изменении всех параметров, может

быть определена с помощью методов анализа нелинейных функций многих случайных переменных. Сочетание оптимальных значений всех семи параметров, при которых ресурс будет иметь локальный максимум, при заданной скорости подачи, может быть найдено симплексным методом [3]. Суть метода в пространстве изом построении "n" параметров n-мерного симплекса (выпуклый многогранник данного числа измерений с (n+1) вершиной). В каждой вершине вычисляется искомая функция (выражение (12)) и выбирается та из них, в которой функция наименьшая. Эта "худшая" вершина отбрасывается, а новый симплекс образуется "n" старыми точками и одной точкой, являющейся зеркальным отражением "худшей" на противоположную грань. Повторение этой процедуры, у которой всегда отбрасывается точка, соответствующая наименьшему значению функции, с соблюдением правил уменьшения размера симплекса (многогранника) и правил, предотвращающих периодические колебания в окрестности экстремума, происходит до тех пор, пока все вершины не стягиваются в пучок. Задача решается на ЭВМ [3]. Нами составлен алгоритм и определено на ЭВМ среднее значение максимального ресурса. Недостаток данного метода в том, что определяется только локальный оптимум. Поэтому для оценки конкретной системы "забой-комбайн" необходимо, изменения шаг варьирования параметрами, добиваться соответствия их оптимума физическому смыслу исследуемого привода.

Найденные оптимальные значения параметров комбайна характеризуют их математическое ожидание. Поскольку частные значения параметров являются случайными величинами и имеют среднеквадратичные отклонения, конкретные значения ресурса находятся в интервале шириной ΔQ относительно его математического ожидания с заданной доверительной вероятностью.

Доверительный интервал функции $Q = f(v_n)$ может быть найден ее разложением в ряд Тейлора в точке с оптимальными параметрами, найденными с помощью симплексного метода. Для удобства записи представим зависимость Q от v_n в виде: $Q = f(v_n, \beta)$, где $\beta = [K_v, K_x, B^*, K_k, P_x, \sigma, K_A]$. Полагая, что v_n может быть задано с достаточной точностью от нуля до максимума ($g v_n = 0$), получим, основываясь на теории ошибок [4],

$$Q = f(\bar{v}_n, \bar{\beta}) + \sum_{i=1}^K \frac{dQ}{d\beta_i} (\beta_i - \bar{\beta}_i) + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \frac{d^2Q}{d\beta_i d\beta_j} (\beta_i - \bar{\beta}_i)(\beta_j - \bar{\beta}_j) \quad (17)$$

Оставив в (17) только линейные члены, получим для Q и σ_Q^2

$$\left. \begin{aligned} \bar{Q} &= f(\bar{v}_n, \bar{\beta}) \\ \sigma_Q^2 &= \sum_{i=1}^K \left(\frac{dQ}{d\beta_i} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Подставив в (18) параметры из (12) и полагая, что $b_{K_x} = 0$ (K_x - мощность пластика - величина детерминированная), получим

$$\sigma_Q = \sqrt{\left(\frac{dQ}{dk_k}\right)^2 \sigma_{k_k}^2 + \left(\frac{dQ}{dp_x}\right)^2 \sigma_{p_x}^2 + \left(\frac{dQ}{da_c}\right)^2 \sigma_{a_c}^2 + \left(\frac{dQ}{dk_A}\right)^2 \sigma_{k_A}^2 + \left(\frac{dQ}{db'}\right)^2 \sigma_{b'}^2 + \left(\frac{dQ}{dk_v}\right)^2 \sigma_{k_v}^2} \quad (19)$$

Все значения Q будут лежать с вероятностью ρ в доверительном интервале $\Delta Q = t_{st} \sigma_Q$, где $t_{st} = 1,96$ – коэффициент Стьюдента для $\rho = 0,95$ и числа степеней свободы $k = n - 1 > 50$ [4])

$$Q = f(\bar{v}_n, \bar{\beta}) \pm \Delta Q \quad (20)$$

Способ определения ΔQ зависит от того, как установлены дисперсии анализируемых параметров.

Если

$$\sigma_{\beta_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\beta_i - \bar{\beta}_1)^2}{n-1}} \quad \text{где } \bar{\beta}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_i.$$

а n -число измерений, то ΔQ определяется с помощью коэффициента Стьюдента.

В нашем случае σ_{p_x} , σ_{a_c} – определены по данным $n = 500$ измерений, а σ_{k_A} , $\sigma_{b'}$ и σ_{k_v} – по 200 измерений. Поэтому, если снова нужно определить доверительный интервал ресурса для комбайнов других типов, то проводить все испытания в таких больших объемах нет необходимости, так как среднеквадратичная ошибка σ_{β_1} (или другая, связанная с ней характеристика точности измерения параметров) при той же методике испытания комбайнов остается неизменной. В этом случае ширину доверительного интервала значений ресурса Q можно определить с помощью интервала вероятностей. При нормальном распределении случайной величины, вероятность Φ того, что Q лежит в интервале $Q \pm \Delta Q$ определяется по формуле:

$$\Phi_t = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-t^2/2} dt, \quad (21)$$

где

$$t = \frac{Q - \bar{Q}}{\sigma_Q} \text{ и } \Phi_t = \rho/2$$

$$\Delta Q = t \sigma_Q \quad (22)$$

Значение t определяется по табличным данным [5] функции Лапласа, интеграла вероятностей для $\Phi_t = \rho/2$.

Из кривых представленного рисунка следует, что чем меньше дисперсия показателей качества комбайнов (меньше брака при изготовлении) и стабильнее режим их работы, тем меньше ΔQ и с большей точностью можно прогнозировать долговечность приводов.

Разработанный метод определения ресурса и факторов, определяющих его дисперсию, может быть применен для любых машин и механизмов, испытывающих как динамические случайные нагрузки (G_β - велико), так и их детерминированные значения (G_β - мало).

Для прогноза ресурса машины необходимо знать основной интегральный показатель ее качества – энергоресурс, характеризующий конструкцию, технологию изготовления и материал элементов.

Достоверность любых методов исследования характеризуется их физическим правдоподобием и проверяется практикой. Достоверность предложенного метода оценки ресурса комбайнов базируется на законе сохранения энергии. Только энергия, теряемая в машине, определяет долговечность ее элементов, так как расходуется на их разрушение. Преобразование механической энергии внешнего и внутреннего трения преобразуется в тепловую энергию, выделяемую в окружающую среду с потерями, которые расходуются на разрушение элементов машины.

Достоверность и стабильность семи параметров, используемых для оценки системы "забой-комбайн" подтверждается 10-летним применением стендов ЛГИ на заводе с численной оценкой показателей точности изготовления комбайнов – P_x , a_c , K_A . Эти параметры применяются в технике. Показатели режима работы комбайна, его нагрузки B^1 и K_V определяются экспериментально или расчетом по отраслевым стандартам Минугипрома СССР.

Анализ существующих методов расчета деталей машин на долговечность по допустимым напряжениям показал его бесперспективность для оценки ресурса комбайнов по трем причинам: сложный комбинированный вид и характер нагрузок; невозможность определения численного значения результатирующих напряжений в деталях; невозможность учитывать через напряжения реологию и время действия нагрузок.

Второй существующий и признанный метод прогнозирования ресурса – метод теории надежности – также неприемлем для таких машин и систем как комбайн. Ресурс комбайна зависит от совокупных свойств системы "забой-комбайн", численные значения которых меняются случайным образом, а их число велико (не менее семи – см. выше). Поэтому регламентированные теорией надежности методы сбора и обработки статистических данных о ресурсе не позволяют с достаточной точностью прогнозировать предельное состояние комбайна.

Представленный комплексный метод прогнозирования ресурса комбайна, доведенный до инженерного решения позволяет: эксплуатационникам более эффективно использовать забойную технику; ремонтным службам и заводам-изготовителям контролировать выпускаемую продукцию с численной оценкой показателей их качества; конструкторам выбирать параметры и технологии изготовления проектируемого комбайна с заданными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ОСТ 12.44.258-84 Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. М., Изд. Министерства угольной промышленности СССР, 1984, 107 стр.
- [2] Коломийцов М.Д., Метод прогнозирования наработки комбайнов. Записки ЛГИ, т. 87, Ленинград, 1981, стр. 3-11.
- [3] Химмельбау Д., Анализ процессов статистическими методами. М.. Мир, 1973, стр. 957.
- [4] Свешников А.А. Основы теории ошибок. Ленинград, изд. ЛГУ, 1972, стр. 122.
- [5] Румянинский Л.З., Математическая обработка результатов эксперимента. М., Наука, 1971, стр. 192.

Recenzent: Prof. dr inż. Zbigniew KORECKI

Wpledzone do Redakcji: luty 1986 r.

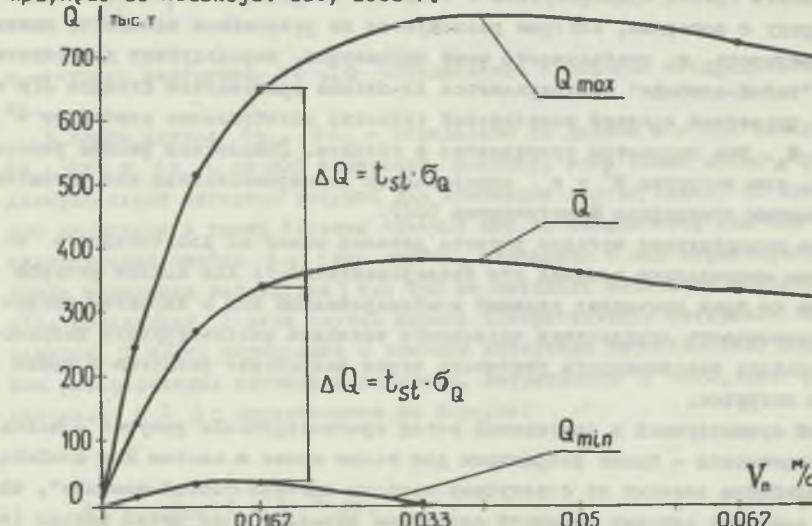


Рис. 1. Зависимость математического ожидания ресурса Q комбайна КШ-ИКГ и его доверительного интервала ΔQ от скорости подачи V_n . Q_{\max} и Q_{\min} - максимальные и минимальные значения ресурса

Rys. 1. Zależność matematycznego oczekiwanej okresu pracy Q kombajnu KSz-1KG i jego przedziału ufności ΔQ od prędkości posuwu V_n . Q_{\max} i Q_{\min} - maksymalne i minimalne wartości okresu pracy

METODA PROGNOZOWANIA OKRESU BEZAWARYJNEJ PRACY KOMBAJNU

S t r e s z c z e n i e

W pracy omówiono nową metodykę obliczania okresu bezawaryjnej pracy maszyn (na przykładzie napędu kombajnu), uwzględniającą liczbowe wskaźniki jakości oraz warunki eksploatacji i obciążenia. Został opracowany algorytm wiążący okres bezawaryjnej pracy kombajnu z 8 wskaźnikami charakteryzującymi system "przodek-kombajn". Zdefiniowano nową fizyczną właściwość maszyn (napędów, detali) - zasób energetyczny - graniczną ilość energii, która może być rozproszona w postaci strat w okresie pracy maszyny. Zasoby energetyczne są niezależne od obciążenia, a określone konstrukcją maszyny (napędu) i technologię wykonania.

Opracowano i wdrożono nową metodę określania wskaźników jakości produkcji i montażu kombajnów według strat mocy w funkcji obciążenia. Funkcje te określa się na stanowisku badawczym w trakcie prób zdawczo-odbiorczych zmontowanego w zakładzie kombajnu. Przy pomocy metody sympleksowej zbadano czynniki określające dokładność prognozowania czasu pracy kombajnu powyższym sposobem przystosowanym do obliczeń inżynierskich.

METHOD OF FORECASTING FAILURE-FREE OPERATION OF MINING COMBINES

S u m m a r y

The paper discusses a new method of computing a period of failure-free operation of combines (on the basis of the combine drive). The presented method includes parameters of quality and conditions of operation and load. An algorithm connecting the period of failure-free operation with 8 parameters characterizing the system - "face-combine" has been worked out. A new physical property of machines (i.e., of drives and details) has been defined. This property - power resource - is the boundary amount of energy which can be dissipated in the form of losses during the operation of a machine. Power resources are independent of load and determined by the construction of a machine (its drive) and by the technology of production. A new method of determining parameters of quality of production of combines according to losses of power in the load function has been worked out and implemented. This function is determined on a test-stand during tests of a produced combine.

Factors determining accuracy of forecasting the time of the operation of a combine have been investigated with the help of the simplex method.