

УДК 622.232.83

О.Е. ШАБАЕВ, канд. техн. наук,

А.К. СЕМЕНЧЕНКО, доктор техн. наук

А.И. ХИЦЕНКО, канд. техн. наук

(ДонНТУ)

Обоснование макроуровневых параметров проходческого комбайна

В настоящее время требует решения задача создания угледобывающих предприятий типа «лава–шахта» с увеличением добычи угля из очистного забоя до уровня 10000 т/сут и более. Для достижения такой добычи важно обеспечить своевременную подготовку очистных забоев на основе ускорения темпов проведения подготовительных выработок.

В результате сравнительного анализа технических характеристик последних моделей проходческих комбайнов как отечественного, так и зарубежного производства обнаружилось, что общая энерговооруженность комбайнов среднего типа (масса 30–45 т) составляет порядка 170–230 кВт при мощности привода резания 75–140 кВт [1]. Данные показатели не могут рассматриваться как окончательные и требуют уточнения с учетом необходимости существенного повышения темпов проходки выработок [2, 3], а также перспектив развития выемочной техники [4], комплексной взаимосвязи и параллельности во времени ведения очистных и подготовительных работ на горнодобывающем предприятии. В то же время экспериментально установлено [5], что производительность разрушения горного массива проходческим комбайном среднего типа обеспечивается на среднем уровне в 38% и не более 60% от потенциально возможной производительности вследствие неэффективного управления. Повышение эффективности использования потенциальных возможностей проходческих комбайнов можно обеспечить на основе мехатронного подхода к их созданию, предусматривающего параллельное проектирование силовых и управляющих систем машины и компьютерное управление ее рабочими процессами [6, 7].

Цель данной статьи – обоснование основных макроуровневых параметров проходческого комбайна – его массы, ресурса и мощности привода исполнительного органа, обеспечивающих требуемые темпы проходки с учетом фактического уровня эффективности использования его потенциальных возможностей, а также перспектив применения мехатронного подхода к проектированию таких машин.

Между массой M и мощностью привода исполнительного органа P проходческого комбайна (рис. 1) существует корреляционная связь: $M = k_1 P + k_0$, где $k_0 = 10,7$ т, $k_1 = 0,27$ т/кВт - коэффициенты уравнения регрессии. При этом доверительный интервал с вероятностью 95% составляет $[M - 2\sigma_M, M + 2\sigma_M]$, где $\sigma_M = 13,6$ т - среднеквадратическое отклонение.

Для прогнозирования требуемых параметров проходческого комплекса была разработана математическая модель процесса комбайновой проходки выработки с учетом следующих допущений:

- фактическое значение наработки комбайна до капитального ремонта - величина постоянная и соответствует паспортному значению ресурса для работы по породам соответствующей крепости;
- коэффициенты готовности и организации работ – постоянные в пределах рассматриваемого временного интервала проходки выработки;
- при неизменной технологии ведения проходческих работ длительность не совмещенных с разрушением забоя вспомогательных операций на 1 м проходки выработки – величина постоянная (не зависит от темпа проходки);
- масса комбайна линейно зависит от мощности привода его исполнительного органа и не зависит от диапазона площади сечений выработок, на который рассчитан комбайн, а также конструктивных решений его узлов.

На основании приведенных допущений модель процесса комбайновой проходки выработки имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_c = L / (n_{p\partial} L V_m^{-1} - T_{пв} - T_{м-д} n_{м-д}); \quad n_{м-д} =] L S k_s / R [+ 1; \\ Q_T = \begin{cases} V_c S k_s / 60 T_c k_m & \text{— при ускорении или совмещении операций;} \\ V_c S k_s / 60 T_c [k_{opz} k_z + V_c V_{c0}^{-1} (k_m - k_{opz} k_z)] & \text{— при отсутствии ускорения} \\ & \text{или совмещения операций;} \end{cases} \\ (P/W) = 60 Q_T / k_{uP}; \quad P = (P/W) W k_W; \quad M = k_1 P + k_0, \end{array} \right.$$

где V_c – суточный темп проходки, м/сут; L – длина выработки, м; $n_{p\partial}$ – число рабочих дней в месяц; V_m – месячный темп проходки, м/мес; $T_{пв}$ – время подготовки выработки к монтажу проходческого комплекса, сут; $T_{м-д}$ – длительность монтажа/демонтажа проходческого комплекса, сут; $n_{м-д}$ – число монтажей–демонтажей комплекса за время проходки выработки; S – площадь сечения выработки в проходке без перебора, м²; k_s – коэффициент перебора породы по контуру выработки, учитывающий превышение размера обрабатываемого сечения по сравнению с требуемым; R – ресурс комбайна, м³; Q_T – теоретическая производительность разрушения забоя исполнительным органом комбайна, м³/мин; T_c – длительность рабочего времени в сутки, час; k_m – коэффициент машинного времени; k_{opz} – коэффициент, учитывающий простои комбайна из-за несовершенства организации работ; k_z – коэффициент готовности комбайна; V_{c0} – базовое значение суточного темпа проходки (принимается по опыту эксплуатации комбайна в аналогичных условиях и используется для учета изменения k_m вследствие изменения соотношения времени разрушения забоя и времени несомещенных сопутствующих операций при неизменной технологии проходки), м/сут; (P/W) – мощность привода резания, приведенная к единице удельных энергозатрат разрушения забоя; P – мощность привода исполнительного органа, кВт; k_{uP} – коэффициент использования установленной мощности двигателя привода исполнительного органа; W – удельные энергозатраты процесса разрушения забоя исполнительным органом в оптимальном режиме, кВтч/м³; k_W – коэф-

коэффициент удельных энергозатрат разрушения забоя, учитывающий их повышение вследствие отклонения режима разрушения от оптимального; M – масса комбайна, т; k_0 , k_1 – коэффициенты уравнения регрессии массы комбайна от энерговооруженности его исполнительного органа.

Модель увязывает между собой основные макроуровневые параметры комбайна – энерговооруженность исполнительного органа, массу и ресурс с основным показателем его технического уровня – месячным темпом проходки выработки.

Для обоснования направлений совершенствования проходческих комбайнов на базе разработанной модели были проведены исследования для следующих условий: требуемый темп проходки 300 и 500 м/мес; длина проходимой выработки 1000 и 2000 м; площадь сечения выработки в проходке 16 и 25 м²; среднее временное сопротивление одноосному сжатию разрушаемых пород 40 и 100 МПа (соответственно удельные энергозатраты процесса разрушения забоя 2 и 11 кВтч/м³). Для указанных условий оценивались макроуровневые параметры комбайна энергомеханической (традиционной) и мехатронной конструкций. При этом рассматривались следующие технологии проходческих работ:

- существующая технология без совмещения вспомогательных операций проходческого цикла с процессом разрушения забоя исполнительным органом. При этом длительность вспомогательных операций на 1 м проходки остается неизменной, а коэффициент машинного времени с увеличением суточного темпа проходки снижается;

- существующая технология без совмещения вспомогательных операций проходческого цикла и с ускорением выполнения вспомогательных операций на 1 м проходки пропорционально теоретической производительности разрушения забоя. При этом с увеличением суточного темпа проходки коэффициент машинного времени остается неизменным;

- технология проходки, обеспечивающая совмещение вспомогательных операций проходческого цикла с процессом разрушения забоя. В этом случае коэффициент машинного времени стремится к 1.

Для реализации модельных исследований процесса комбайновой проходки выработки необходима оценка параметров модели. Перебор породы по контуру выработки составляет до 20% от площади сечения выработки в черне ($k_S=1,2$). Снижение k_S до 1 может быть обеспечено на основе повышения качества реализации сложных и точных движений исполнительного органа, что характерно для мехатронных машин [6, 7]. Среднее значение коэффициента машинного времени согласно результатам экспериментальных исследований [5] составляет $0,18 \pm 0,04$ при суточном темпе проходки 4 м/сут. Из опыта эксплуатации проходческих комплексов, k_M находится в пределах от 0,2 до 0,4, при чем большие значения обеспечиваются для более энерговооруженных комбайнов. Коэффициент машинного времени наряду со степенью совершенства технологии проходческих работ отражает уровень организации работ и надежность комбайна. Так как в каждом конкретном забое длительность несомещенных технологических операций проходческого цикла из расчета на 1 м проходки практически постоянна, колебания значений сменного коэффициента машинного времени обусловлены сбоями в организации работ (k_{op2}) и отказами оборудования (k_z). Поэтому максимальное зарегистрированное значение k_M соответствует работе без отказов и непроизводительных простоев, следовательно $k_{op2}k_z = k_{мсп} / k_{ммакс}$, где $k_{мсп}$, $k_{ммакс}$ – среднее и максимальное зарегистрированное значение сменного коэффициента машинного времени. Согласно [5] $k_{op2}k_z = 0,53$. Энергоемкость процесса разрушения забоя определяется физико-механическими характеристиками разрушаемых пород, параметрами режущего инструмента и исполнительного органа а также параметрами режима разрушения забоя – скоростями подачи и вращения коронки, глубиной ее зарубки и шагом фрезерования. Выбор рациональных параметров и их точное воспроизведение в процессе обработки

забоя позволяет снизить удельные энергозатраты по сравнению с ручным управлением комбайном как минимум на 20 % [6, 7]. Таким образом, можно принять коэффициент удельных энергозатрат k_w при традиционной и механической конструкциях комбайна соответственно 1,2 и 1. Коэффициент $k_{уп}$ характеризует недоиспользование установленной мощности привода исполнительного органа из-за несовершенства принятого способа регулирования нагрузки на двигатель привода исполнительного органа в заданном диапазоне изменения прочностных характеристик разрушаемых пород. В работе [5] экспериментально определено среднее значение $k_{уп} = 0,74 \pm 0,05$ при максимальном временном сопротивлении пород одноосному сжатию 80 МПа. Для забоев с менее прочными породами это значение будет несколько ниже. В то же время применение интеллектуального управления позволяет повысить $k_{уп}$ практически до 1 [6, 7].

Для наглядности и упрощения расчетов, связанных с использованием разработанной выше математической модели процесса комбайновой проходки выработки, была разработана номограмма, позволяющая осуществлять выбор основных макроуровневых параметров проходческого комбайна исходя из заданного темпа проходки выработки. На рис. 2 приведена номограмма, соответствующая условиям: площадь сечения выработки 16 м^2 ; длина выработки 1000 м. Для построения номограммы приняты значения базовых темпов проходки $V_{с0} = 4, 6, 8 \text{ и } 10 \text{ м/сут}$ при соответствующих коэффициентах машинного времени $k_m = 0,2; 0,3; 0,4 \text{ и } 0,5$. Номограмма позволяет выполнять анализ прямым и обратным ходом.

При прямом ходе (см. рис. 2, сплошные стрелки) исходным является требуемый месячный темп проходки. С учетом различного возможного числа капитальных ремонтов за время проведения выработки определяется требуемый суточный темп проходки. По суточному темпу проходки с учетом прогнозируемого значения k_m определяется требуемая теоретическая производительность комбайна, по которой с учетом коэффициента использования

мощности устанавливается ряд значений приведенной мощности (P/W). Исходя из физико-механических свойств разрушаемых пород (средневзвешенное значение $\sigma_{сж}$) прогнозируются мощность привода исполнительного органа и масса комбайна. Из полученной совокупности комбинаций ресурса, мощности и массы отбираются технически реализуемые. В качестве технически реализуемых принимались комбинации с мощностью привода не более 1000 кВт и ресурсом, превышающим типичные значения не более чем в 2–3 раза. Обратный ход (см. рис. 2, пунктирные стрелки) выполняется на основе известной мощности привода исполнительного органа комбайна. При этом определяется месячный темп проходки выработки при различных прочностях разрушаемых пород и соответствующих им ресурсах.

При модельных исследованиях учитывались следующие функциональные отличия мехатронной конструкции от традиционной: повышение ресурса при неизменной металлоемкости (не менее чем в 2 раза [7]); увеличение коэффициента использования мощности привода исполнительного органа с 0,6–0,7 до 0,95; снижение удельных энергозатрат процесса разрушения забоя на 20 %; исключение перебора породы по контуру выработки.

Анализ результатов модельных исследований позволил установить:

- макроуровневые параметры проходческих комбайнов традиционной конструкции с учетом требований к увеличению темпов проходки и площади сечений выработок при характерных значениях коэффициента машинного времени 0,2–0,4 должны быть существенно повышены. Комбайн для проходки выработки площадью сечения порядка 16 м² по породам с $\sigma_{сж} = 100 \text{ МПа}$ и темпом 300 м/мес должен иметь мощность привода исполнительного органа 850–990 кВт и массу 240–280 т при ресурсе 10 тыс. м³ или соответственно 620–690 кВт и 180–200 т при ресурсе 20 тыс. м³. Темпы проходки 500 м/мес, а также 300 м/мес при площади сечения выработки порядка 25 м² требуют установки мощности привода исполнительного органа значительно более 1000 кВт, что технически трудно реализуемо.

- в случае повышения коэффициента машинного времени комбайна за счет ускорения и совмещения с разрушением забоя операций проходческого цикла при проведении выработки площадью сечения $16\text{--}25\text{ м}^2$ по породам с $\sigma_{сж} = 100\text{ МПа}$ для реализации темпа проходки 300 м/мес требуется мощность привода исполнительного органа не менее $250\text{--}420\text{ кВт}$, масса комбайна составит не менее $80\text{--}130\text{ т}$ при ресурсе не менее $10\text{--}20\text{ тыс. м}^3$. В этих же условиях для реализации темпа проходки 500 м/мес требуемые минимальные значения макроуровневых параметров составят соответственно $470\text{--}730\text{ кВт}$, $140\text{--}210\text{ т}$ и $10\text{--}30\text{ тыс. м}^3$.

- реализация мехатронной конструкции комбайна, обеспечивающей заданный темп проходки, позволит снизить требования к мощности привода исполнительного органа и массе комбайна на $40\text{--}60\%$ для всего диапазона применения комбайнов с режцовым рабочим инструментом. При характерных для существующих комбайнов параметрах применение мехатронного подхода позволит повысить месячный темп проходки от 14 до 60% . В случае ускорения вспомогательных операций проходческого цикла на 1 м проходки пропорционально теоретической производительности разрушения забоя комбайном прирост темпа проходки более существенный – от 60 до 120% . Эффект усиливается для выработок большей площади сечения (примерно пропорционально увеличению площади сечения) и практически не зависит от длины проходимой выработки.

Литература

1. Горные машины для подземной добычи угля // Горбатов П.А., Петрушкин Г.В., Лысенко Н.М. и др. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – 669 с.
2. Перспективы развития проходческих комбайнов / Семенченко А.К., Шабаетов О.Е., Семенченко Д.А., Хиценко Н.В. – Горная техника 2006. Каталог–справ. – СПб: ООО «Славутич». – С. 8–15.
3. Семенченко А.К., Шабаетов О.Е., Семенченко Д.А., Хиценко Н.В. Перспективы создания проходческих комбайнов нового технического уровня // Горная техника 2005. Каталог–справочник. – С–Пб: ООО «Славутич». – С. 60–69

4. Косарев И.В., Андреев Г.В., Приседский Е.В., Ильин А.И. Комплексная механизация очистных работ и тенденции ее развития// Решение научно-технических проблем при создании и внедрении современного горно-шахтного оборудования: Зб. наук. праць. – Донецьк: ГП Донгипроуглемаш, 2008. – Вип. 113. – С. 62–73.
5. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хищенко Н.В., Стадник Н.И. Экспериментальные исследования режимов работы исполнительного органа проходческого комбайна // Горное оборудование и электромеханика. №10. С.49 – 59.
6. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хищенко Н.В. Адаптивная оптимизация цикла обработки и параметров режима разрушения забоя проходческим комбайном избирательного действия по критерию темпа проходки // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научных трудов, Вып. 39. – Донецк, 2010. – С.210–219.
7. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хищенко Н.В. Адаптивная оптимизация цикла обработки и параметров режима разрушения забоя проходческим комбайном избирательного действия по критерию ресурса // Науковий вісник Національного гірничого університету. № 6, 2010. – С. 36–42.