

О.Е. Шабает /д.т.н./

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

А.Ю. Довгань

ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова» (Донецк)

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА КСП-35 В ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Экспериментально определены нагрузочные характеристики двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35, полученные при прохождении монтажного хода на шахте им. А.Ф. Засядько. Установлены значения средней мощности на разрушение за цикл обработки забоя, фактической длительности рабочего цикла, дана оценка удельных энергозатрат разрушения забоя. Установлена значительная неравномерность значений характеристик рабочего процесса комбайна вследствие погрешностей как ручного управления, так и точности позиционирования машины в выработке, что приводит к снижению производительности и ресурса комбайна. Предложены пути совершенствования способа управления проходческим комбайном с целью повышения его эффективности, снижения переборов и повышения производительности.

Ключевые слова: проходческий комбайн, исполнительный орган, рабочий процесс, удельные энергозатраты, производительность, мехатроника.

Постановка проблемы

Угольная промышленность является основной сырьевой и энергетической базой для всех отраслей народного хозяйства, а каменный уголь – единственным стратегическим энергоносителем, имеющимся в недрах нашей страны. Обеспечение конкурентоспособности угольных шахт Донбасса может быть достигнуто путем роста нагрузок на очистные забои до 5 тысяч и более тонн в сутки. Основным фактором, сдерживающим рост нагрузки на современные добычные комплексы, является отставание в подготовке нового фронта очистных работ, т.е. недостаточно высокие темпы проходки при проведении подготовительных выработок.

Прохождение выработок механизированным способом при помощи проходческих комбайнов на сегодняшний день является наиболее эффективным, позволяющим уменьшить время технологических операций и повысить темпы проходки до 300 м в месяц и более. Необходимость обеспечения все более высоких темпов проходки приводит к проблеме повышения технического уровня проходческих комбайнов. Применение существующих математических моделей и методов оптимального проектирования этих машин возможно лишь при корректном задании режимов их работы, которые могут быть получены

только в результате натурального эксперимента. Данные эксперимента также могут быть использованы при проверке адекватности математических моделей рабочих процессов и обосновании путей дальнейшего совершенствования проходческих машин.

Поэтому получение экспериментальных данных о фактических режимах работы двигателя исполнительного органа (ИО) проходческого комбайна, его нагруженности и затратах времени на выполнение операций при реализации технологического цикла обработки забоя стреловидным исполнительным органом проходческого комбайна является актуальной научной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций

К вопросу эффективности проходческого комбайна и управления им обращаются ученые с 80-х годов XX в. Сформулированы критерии эффективности [1,2] и подходы к конструированию как отдельных подсистем [3,4], так и комбайна в целом [5].

Энергоэффективность и максимальная производительность являются целевыми функциями в данных системах с множеством ограничительных параметров.

С развитием вычислительной техники изменяются требования к системам управления проходческими машинами и к проектированию новой техники. Делается упор на интеллектуальное управление с повышением количества учитываемых факторов для снижения влияния оператора на качество обработки забоя. Мехатронный подход требует одновременного проектирования силовой части и системы управления комбайном. Проходческий комбайн представляется системой взаимодействующих элементов между собой и внешними факторами среды, вносящими свой вклад в рабочий процесс [6,7].

В большинстве современных проходческих комбайнов реализованы ручные режимы управления – местный и дистанционный в зоне видимости, что ставит процесс разрушения забоя в прямую зависимость от обученности и опыта оператора. Кроме того, оператор зачастую не владеет информацией о нагрузке на двигатель исполнительного органа, эффективности процесса разрушения и может только визуально оценить границу перехода между пластом угля и породой. При таком способе управления возможно получить только средние показатели эффективности, основанные на случайном характере распределения нагрузки на электродвигатель исполнительного органа.

Цель (задачи) исследования

Целью работы является экспериментальное получение и анализ характеристик рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого комбайна, позволяющих оценить эффективность использования комбайна. Эти результаты будут использованы в дальнейшем для теоретического обоснования перспективных путей совершенствования проходческих комбайнов.

Основной материал исследования

Условия проведения эксперимента. В качестве типичного представителя комбайнов среднего типа был принят проходческий комбайн КСП-35 (рис. 1).

Исследования проводились в представитель-

ных условиях эксплуатации при прохождении проходческим комбайном КСП-35 монтажного ходка 8-й восточной лавы пл. I₄ на шахте им. А.Ф. Засядько в течение двух недель работы. Схема разработки пласта – прямой ход по комбинированной схеме разработки с повторным использованием конвейерного штрека в качестве вентиляционного.

В соответствии с паспортом проведения и крепления монтажного ходка длина выработки составляет 280 м, сечение – 17,9 м², угол падения пласта – 11 градусов. Выработка проводится по падению пласта с двух заходов. Пласт опасен по газу, взрывчатости угольной пыли, сульфурным выделениям метана, внезапным выбросам угля и газа, содержит включения (линзы, стяжения пирита), приток воды – до 3 м³/час. Структура проходческого забоя, представляющая собой наслоение алеволита, угля, аргиллита и алеволита (от почвы к кровле), показана на рис. 2.

Комбайн КСП-35 питается от передвижной трансформаторной подстанции напряжением 660 В. В соответствии с паспортом комбайна КСП-35, номинальная мощность двигателя исполнительного органа составляет 132 кВт. Номинальный ток составляет 152 А (при 660 В) при cosφ=0,76.

Реализация эксперимента. Для проведения эксперимента была разработана методика, в соответствии с которой в течение 288 часов (12 суток) осуществлялась непрерывная регистрация с шагом 1 с действующего значения тока двигателя, усредненного за 1 с. С целью возможности дальнейшей обработки полученных массивов данных одновременно осуществлялся хронометраж работы комбайна. За период проведения эксперимента комбайном было пройдено 60,0 м выработки (соответственно посуточно – 5 м/сут.).

Пример реализации тока двигателя приведен на рис. 3. На рисунке представлен цикл разрушения массива комбайном КСП-35 во вторую смену 15.11.2016 г. Уставка технологического перегруза установлена на значении 173 А, ток опрокидывания составляет 360 А, уставка максимальной токовой защиты – 1730 А.

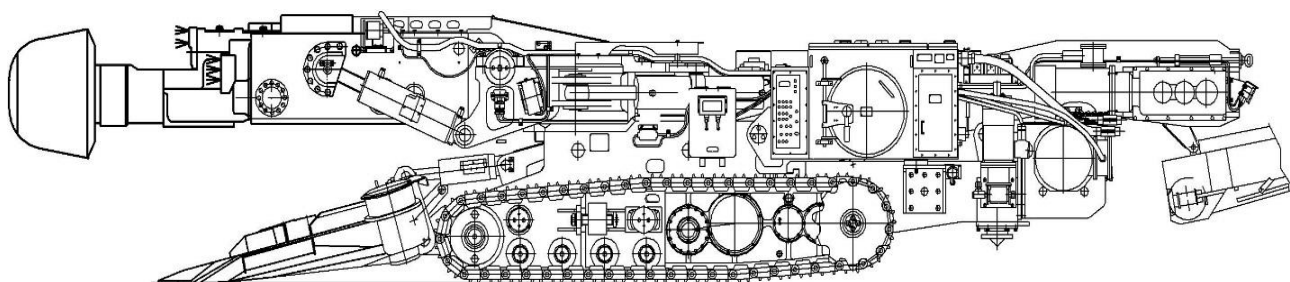


Рис. 1. Проходческий комбайн КСП-35

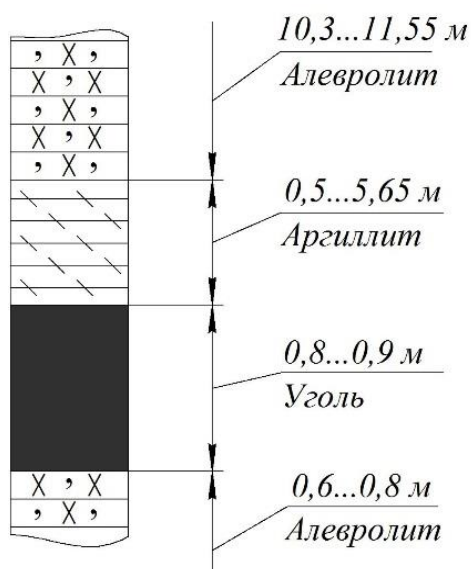


Рис. 2. Структура пород проходческого забоя

На рис. 3 овалами отмечены зоны свободного вращения исполнительного органа без нагрузки, которые не учитываются при определении времени цикла обработки забоя и, соответственно, среднего тока нагрузки ИО для каждого цикла.

Для каждого цикла ток холостого хода I_{xxi} определен отдельно и составляет от 31,5 А до 35,3 А. Разброс значений тока I_{xxi} обусловлен колебанием напряжения сети в разные дни.

При обработке массива данных значений тока двигателя исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 получены дискретные значения тока с равным шагом 1 с, которые впоследствии использованы для определения средних и экстремальных значений. Для каждого цикла обработки забоя по полученным характеристикам определены следующие параметры:

$T_{фактi}$ – фактическое время цикла;

i – индекс, соответствующий номеру цикла;

$T_{рабi}$ – время цикла обработки забоя за вычетом времени простоя и холостого хода;

I_{xxi} – ток т.н. холостого хода при вращении ИО комбайна без нагрузки;

$I_{срi}$ – средний ток соответствующего цикла и смены без учета I_{xxi} во время простоя.

Полученные значения параметров времени цикла, среднего тока и исходные паспортные данные комбайна КСП-35 позволяют определить мощность комбайна, расходуемую на разрушение массива:

$$P_i = \sqrt{3}(I_{срi} - I_{xxi\min}) \cdot \frac{P_{ном}}{I_{ном} \cdot \eta_{\Sigma}} \cdot \cos(\varphi(I)), \quad (1)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность двигателя исполнительного органа; $\eta_{\Sigma}=0,8$ – суммарный КПД исполнительного органа, учитывающий КПД двигателя и редуктора ИО; $\cos(\varphi(I))$ – зависимость коэффициента мощности двигателя от полного тока, полученная экспериментально для данного двигателя.

С учетом выражения (1) для каждого цикла обработки забоя определяется значение удельных энергозатрат на разрушение забоя, кВтч/м³:

$$W_i = \frac{P_i \cdot T_{рабi}}{S \cdot B \cdot 60}, \quad (2)$$

где $S=17,9$ м² – сечение выработки; $B=0,5$ м – глубина зарубки.

Для определения теоретической производительности проходческого комбайна в функции мощности привода исполнительного органа используется зависимость:

$$W_i = \frac{P_i}{Q}. \quad (3)$$

Результаты эксперимента. С использованием специализированного программного обеспечения были получены характеристики рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого комбайна КСП-35.

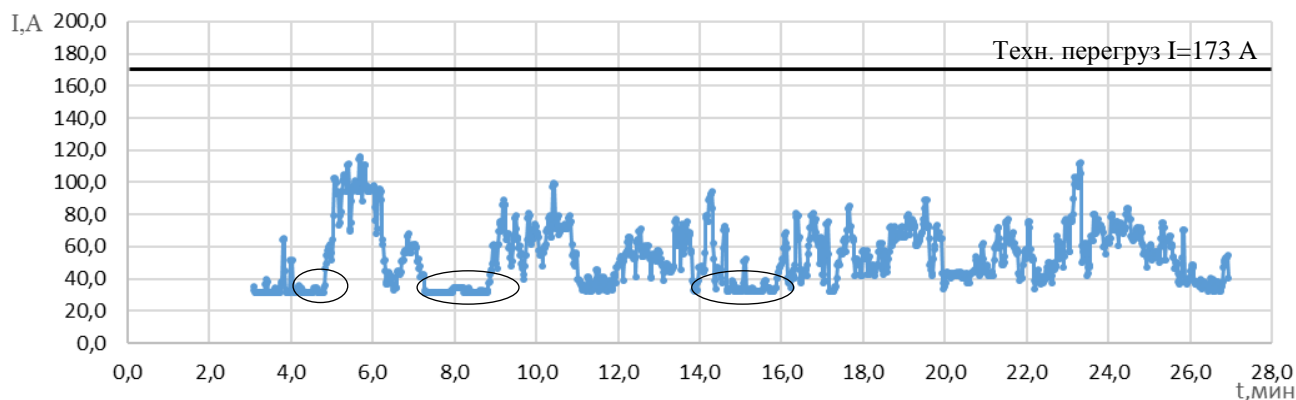


Рис. 3. Фрагмент записи тока двигателя за цикл обработки забоя комбайном КСП-35

На рис. 4 представлена гистограмма распределения средней мощности электродвигателя исполнительного органа P_i комбайна КСП-35, используемой за полный цикл разрушения забоя. Рассмотрено 33 цикла во вторую, третью и четвертую смены.

Как видно из рис. 4, разброс используемой мощности электродвигателя ИО при разрушении забоя составляет от 32,01 кВт до 77,10 кВт.

С использованием выражения (2) найдены значения удельных энергозатрат разрушения забоя W_i для i -го цикла. На рис. 5 представлена гистограмма значений W_i для 33-х циклов обработки забоя.

Удельные энергозатраты характеризуют эффективность процесса разрушения забоя с учетом крепости разрушаемой породы, структуры забоя, конструкции исполнительного органа и конструкции режущего инструмента, а также режимных параметров (скорости подачи, резания, глубины зарубки и шага фрезерования исполнительного органа [8]) и перебора породы по контуру выработки. Проходческий комбайн КСП-35 имеет местный и дистанционный режимы управления. Однако эффективность обработки забоя зависит в большей мере от умений оператора.

Как видно из гистограммы рис. 5, колебание значений удельных энергозатрат на цикл обработки забоя значительно, минимальное значение составляет 0,5 кВтч/м³, а максимальное – 2,0 кВтч/м³, то есть в 4 раза больше. Данный разбег значений также свидетельствует о недостаточно эффективном управлении машиной. Одним из путей обеспечения стабильно минимальных значений удельных энергозатрат является применение мехатронного подхода при проектировании проходческого комбайна. Анализируя целый ряд параметров, автоматизированная система управления позволяет подобрать оптимальный алгоритм воздействий на исполнительный орган для максимального использования мощности электродвигателя и достижения максимальной производительности при минимальных энергозатратах.

В соответствии с паспортом проходческий комбайн КСП-35 обладает технической производительностью резания не менее 0,7 м³/мин при $\sigma_{с.ж}$ =60 МПа и не менее 0,45 м³/мин при $\sigma_{с.ж}$ =80 МПа. На рис. 6 представлено поле значений производительности процесса разрушения забоя в зависимости от удельных энергозатрат и коэффициента использования мощности.

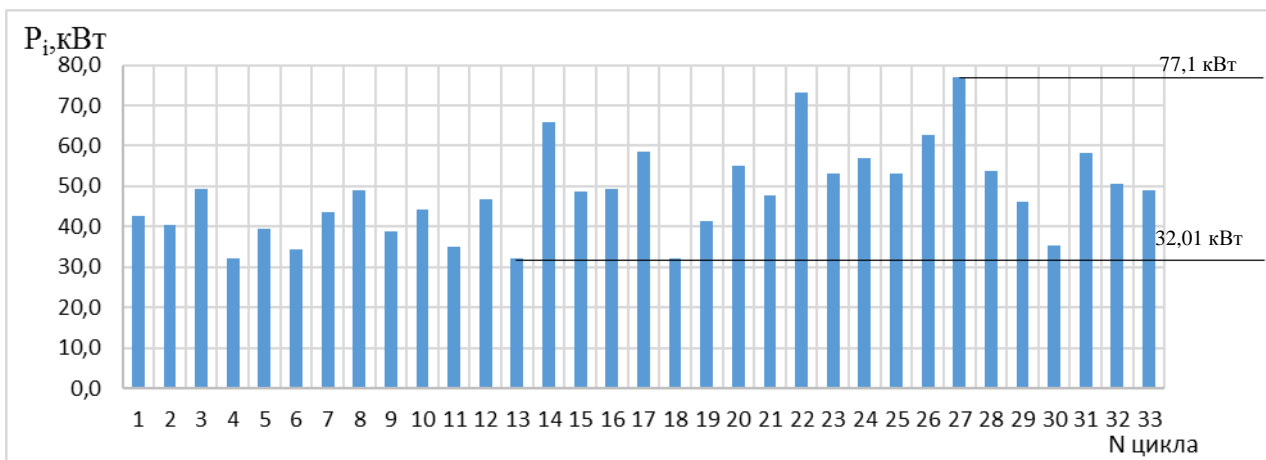


Рис. 4. Значения средней мощности P_i за цикл разрушения забоя

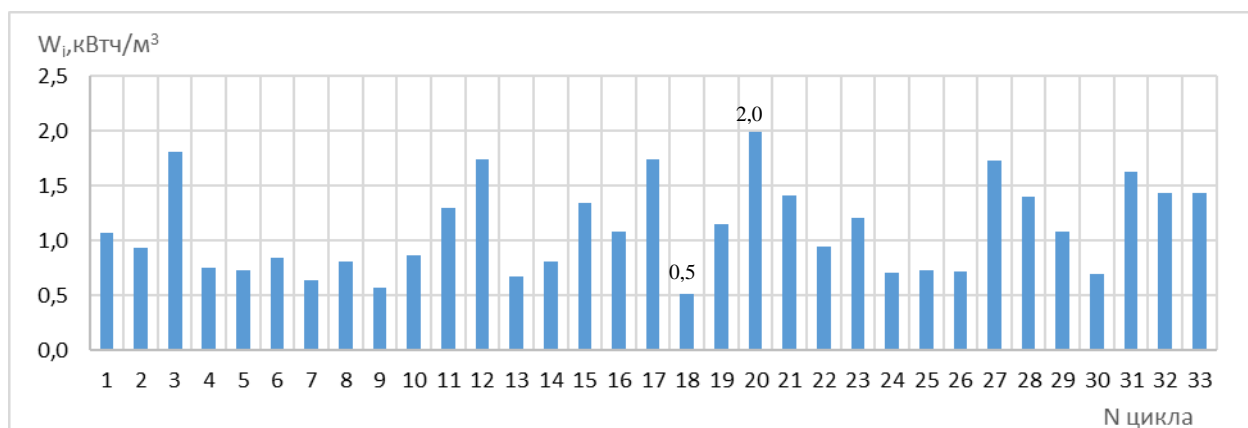


Рис. 5. Удельные энергозатраты на разрушение массива проходческим комбайном КСП-35

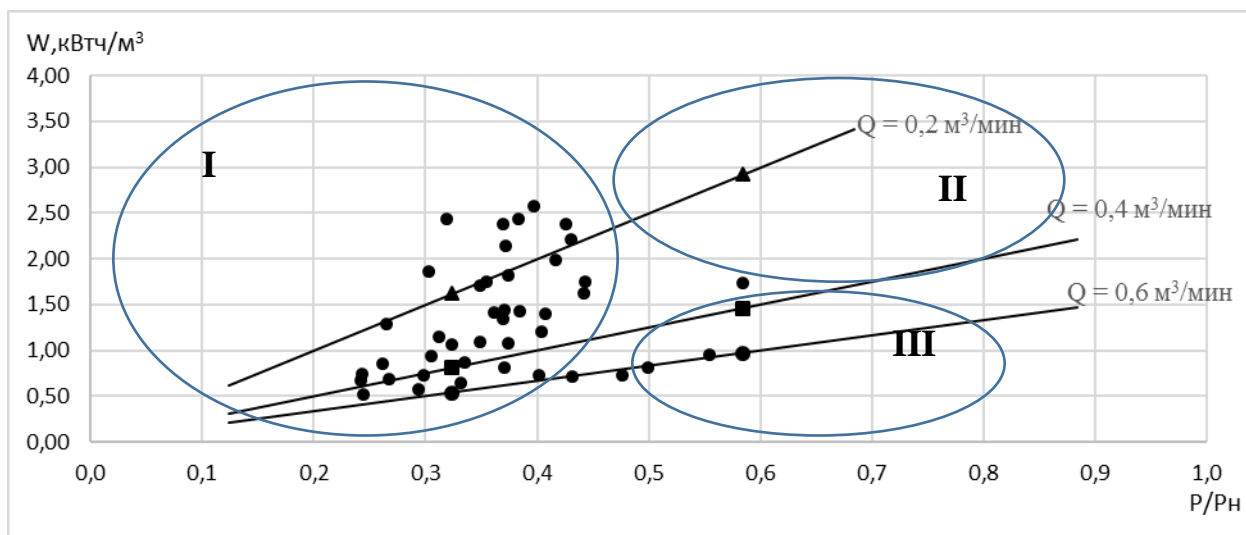


Рис. 6. Поле значений производительности процесса разрушения забоя за цикл

Как видно из рис. 6, большинство значений производительности Q_i попадает в область I, характеризующуюся высокими энергозатратами из-за неэффективного режима разрушения забоя при низкой эффективности использования мощности электродвигателя.

Применение автоматизированной системы управления проходческим комбайном с соответствующим набором датчиков и гибким алгоритмом управляющих воздействий, учитывающего также схему обработки забоя, особенности конструкции, схемы управления и инерционность гидравлики, позволит выйти на рациональные параметры режима разрушения забоя и максимально использовать мощность двигателя, что будет соответствовать зоне III, представленной на графике рис. 4.

В работе [1] сформулированы критерии максимальной производительности проходческого комбайна по току:

$$I_c(t) = I_{\max}(t),$$

$$I_n \leq I_{\max}(t) \leq I_{30}(t) - I_\delta(t) - I_T(t) - I_U(t), \quad (4)$$

$$I_c(t) = I_{30}(t),$$

$$0,7I_n(t) \leq I_{30}(t) \leq I_n(t), \quad (5)$$

$$T_\phi \leq T,$$

где $I_c(t)$ и $I_{\max}(t)$ – среднесменное и максимально допустимое среднее значение тока нагрузки электропривода исполнительного органа; I_n – номинальное паспортное значение тока электродвигателя ИО; $I_{30}(t)$ – заданное максимально до-

пустимое по условиям динамичности нагрузки среднее значение тока; $I_\delta(t)$ – среднее значение динамической составляющей тока нагрузки; $I_T(t)$ – среднее значение составляющей тока нагрузки, учитывающее технологические ограничения по скорости подачи ИО; $I_U(t)$ – среднее значение составляющей тока нагрузки, обусловленное колебаниями напряжения питающей сети.

Критерии (4) и (5) характеризуют основные режимы работы проходческой машины, в том числе с технологическими ограничениями, когда максимальное значение нагрузки не превышает ее номинала. Регулятор нагрузки, реализующий критерий максимальной производительности по нагрузке, в составе системы управления с обратными связями по току способен устранить влияние человеческого фактора при обработке забоя по заложенной схеме, что, в свою очередь, позволит повысить энергоэффективность комбайна и его производительность.

Еще одним направлением повышения эффективности обработки забоя проходческим комбайном является программное управление разрушением массива. Время обработки забоя состоит из нескольких составляющих, являющихся следствием инерционности в работе комбайна.

Одним из недостатков комбайна является его смещение во время работы, которое приводит к переборам и необходимости дополнительных работ по забутовке. При достижении коэффициента переборов $\beta=1,054$ при крепости пород $f>3...4$ сокращается время крепления выработки до 20 % [9]. На величину смещения комбайна влияют следующие факторы: крепость пород обрабатываемого забоя, крепость пород почвы выработки, влажность почвы, кривая почвы по осям выработки. Система управления, учитывающая факторы смещения стрелы исполнитель-

ного органа в координатах проходческого забоя, позволяет уменьшить переборы по сечению выработки и свести к минимуму вспомогательные операции по подготовке забоя к креплению.

Выводы

Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации позволили выявить значительную неравномерность значений характеристик рабочего процесса комбайна вследствие погрешностей ручного управления (значение средней мощности двигателя исполнительного органа за цикл обработки забоя находится в пределах 32,01...77,1 кВт, а удельные энергозатраты – в пределах 0,52...2,57 кВтч/м³). В результате, имеют место отклонения от рациональных режимов обработки забоя, перебор породы по контуру выработки, недостаточное использование мощности привода, что приводит к существенному снижению производительности и ресурса комбайна.

Повышение эффективности проходческого комбайна в современных условиях постоянного повышения темпов прохождения выработки при сокращении длительности вспомогательных операций может быть реализовано на основе мехатронного подхода, который бы стал симбиозом интеллектуальной системы управления и эффективной силовой части для разрушения горного массива с минимальными удельными энергозатратами, минимальными переборами и максимальной производительностью. Необходимо понизить степень зависимости эффективности обработки забоя от субъективного участия оператора в выработке корректирующих и управляющих воздействий на основе опыта, обученности или визуальной оценки ситуации.

Список литературы

1. Войтюк, К.К. Оптимизация управления нагрузкой проходческих машин по критерию

O.Ye. Shabaev /Dr. Sci. (Eng.)/

Donetsk National Technical University (Donetsk)

A.Yu. Dovgan

Avtomatgormash named after V.A. Antipov (Donetsk)

- максимальной производительности // Автоматизация забойного оборудования: сб. научн. тр. №9. – М.: НПО «Автоматгормаш», 1984. – Вып.9. – С. 61-73.
2. Литвинский, Г.Г. Критерии оценки технического уровня горной техники / Уголь Украины. – 2015. – №9. – С. 41-46.
3. Кондрахин, В.П. Оптимизация параметров подсистемы «исполнительный орган» проходческого комбайна КСП-32 / В.П. Кондрахин, В.А. Тарасенко, А.И. Хиценко // Наукові праці ДонНТУ. – 1999. – Вып.99. – С. 121-129.
4. Halama, A. Wireless control and directional navigation of a roadheader in drilling process / A. Halama, P. Loska, P. Szymała // Pomiar Automatyka Robotyka. – 2013. – No.2. – P. 218-223.
5. Оценка эффективности проходческого комбайна с интеллектуальной системой «Управление-подача» исполнительного органа / О.Е. Шабаев [и др.] // Донецк: ДонНТУ, 2009. – 15 с.
6. Jasiulek, D. Mechatronic systems in mining roadheaders-examples of solutions / D. Jasiulek, J. Świder // Pomiar Automatyka Robotyka. – 2013. – No.1. – P. 123-127
7. О стратегии создания интеллектуальных роботизированных систем управления горношахтным оборудованием / В.Г. Курносов [и др.] // Уголь Украины. – 2014. – №1. – С. 12-16.
8. Шабаев, О.Е. Принципы интеллектуализации рабочих процессов мехатронной горной выемочной машины / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко // Вісті Донецького гірничого ін-ту. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – №1. – С. 68-77.
9. Злодеев, А.В. Повышение эффективности программной обработки забоя стреловыми комбайнами / А.В. Злодеев, В.В. Синенко, С.Е. Шумалинский // Автоматизация забойного оборудования: сб. научн. тр. – М.: НПО «Автоматгормаш», 1984. – Вып.9. – С. 57-60.

STUDY OF LOAD CHARACTERISTICS OF THE MOTOR DRIVE OF THE WORKING BODY OF KSP-35 ROADHEADER

Background. The coal industry is the main raw material and energy base for all sectors of the economy, and coal is a strategic energy resource. To increase the load on the breakage faces up to 5 thousand tons per day, it is necessary to ensure high rates of preparatory workings. Real data on the modes of operation of roadheaders can be obtained only as a result of a full-scale experiment and used to confirm the developed mathematical models.

Materials and/or methods. Studies carried out in representative operating conditions during the KSP-35 passing of assembly stroke. During 288 hours (12 days, 33 full cycles of face treatment) continuous registration with step 1 from the current value of the drive motor of the working body averaged for 1 s carried out. For each cycle, according to the obtained data, the duration of the face treatment cycle, the coefficient of machine time and the average current of the motor drive of the working body, defined, also set the average power and the value of specific energy consumption in the process of the face destruction.

Results. A significant unevenness of the values of the characteristics of the working process of face destruction by KSP-35 working body revealed: the power spread during the destruction of the face is 32...77 kW, and the specific energy consumption is from 0.5...2.0 kWh/m³. The field of values of theoretical productivity of the roadheader in function of power inputs and coefficient of the power utilization rate built. The analysis of these data showed that the reasons for the low productivity are both the insufficient use of power and inefficient mode of destruction of the face. The ways of improving the method of control of the roadheader in order to increase the efficiency of its operation, reduce excess rock and increase productivity.

Conclusion. Experimental studies of the load characteristics of the drive motor of the KSP-35 working body in representative conditions of its operation allowed revealing a significant unevenness of the values of the characteristics of the working process of the roadheader due to errors of manual control and insufficient positioning accuracy. Application of mechatronic approach to roadheaders design will allow working with rational parameters of the mode of destruction of a face, excluding excess of rock and as much as possible using the power of the engine on the basis of adaptive optimization of the roadheader working process.

Keywords: roadheader, working body, working process, specific energy consumption, productivity, mechatronics.

Сведения об авторах

О.Е. Шабаев

SPIN-код: 1447-2343
 ORCID iD: 0000-0002-0845-7449
 Телефон: +380 (95) 429-13-32
 Эл. почта: oeshabaev@ya.ru

А.Ю. Довгань

SPIN-код: 5834-1547
 Researcher ID: L-1788-2018
 ORCID iD: 0000-0001-7154-4513
 Телефон: +380 (95) 755-29-58
 Эл. почта: agm_osu@mail.ru

Статья поступила 15.10.2018 г.

© О.Е. Шабаев, А.Ю. Довгань, 2018

Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ

**МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ**



metal.donntu.org

