

УДК 622.232

О.Е. Шабаев (д-р техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет

**ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ И КРИТЕРИЕВ
АДАПТИВНОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
РАБОЧИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА**

Определены задачи адаптивной оптимизации рабочего процесса проходческого комбайна, решение которых должно осуществляться в процессе его функционирования. Для этих задач обоснованы критерии и параметры оптимизации, выполнена декомпозиция и предложен алгоритм решения системой интеллекта комбайна. Установлено, что адаптивная оптимизация рабочих процессов проходческого комбайна позволяет обеспечить высокие темпы проходки (300 м/мес. и более) при сниженных на 40-60 % требованиях к мощности привода исполнительного органа и массе комбайна.

Ключевые слова: мехатроника, проходческий комбайн, синтез, целевая функция, адаптация, темп проходки, ресурс

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Одним из перспективных направлений развития угольной промышленности является максимальная концентрация горных работ («лава-шахта»), что повысит эффективность горнодобывающих предприятий за счет сокращения объемов горных выработок и обслуживаемых машин и установок. Концентрация работ требует применения высокопроизводительной выемочной техники. Учитывая жесткие требования по габаритам и массе к этим машинам, экстенсивные пути их совершенствования только за счет повышения мощности приводов и прочности конструкций не могут обеспечить существенного роста показателей эффективности [1]. Для проходческой техники, как показано в [1] жесткими ограничениями при реализации высоких темпов проходки является масса и энерговооруженность. Одним из эффективных путей совершенствования горных машин является внедрение мехатронных принципов проектирования [2, 3]. Основной отличительной особенностью мехатронной техники является наличие компьютерного управления рабочими процессами, учитывающего неопределенность и изменчивость внешней среды. Поэтому необходимым условием повышения технического уровня этих машин является

адаптивная оптимизация их рабочих процессов, реализуемая системой управления.

Анализ исследований и публикаций. Алгоритмы, закладываемые в систему интеллекта комбайна, должны разрабатываться на основе глубокого изучения его рабочих процессов на этапе проектирования. Это позволит в процессе эксплуатации исключить влияние квалификации оператора на эффективность работы комбайна. Наиболее наукоемким элементов алгоритмов управления является методы адаптивной оптимизации рабочих процессов комбайна, и в первую очередь – процесса разрушения забоя.

Решение задач, стоящих перед системой интеллекта горной машины [4] требует обоснования соответствующих критериев качества для оценки эффективности управления. При этом большинство задач (например, прогнозирование ресурса) имеют межотраслевой характер и достаточно хорошо проработаны в ряде работ [5-7]. Особого внимания требуют специфические для горных машин задачи оптимизации рабочих процессов их подсистем, реализующих разрушение горного массива. Помимо обоснования критериев оптимизации для этих задач требуется обосновать соответствующие целевые функции, позволяющие косвенно количественно оценить качество управления рабочими процессами комбайна.

Постановка задачи. Цель работы – обоснование требований и критериев адаптивного оптимального управления рабочими процессами проходческого комбайна интеллектуальной системой управления на основе текущей информации о состоянии силовых систем машины, данных о параметрах внешней среды и состоянии оборудования проходческого комплекса.

Изложение материала и результаты.

Основными критериями эффективности проходческого комбайна являются эксплуатационная производительность (темп проходки) и ресурс. При эксплуатации проходческого комбайна могут возникать две типичные производственные ситуации [8]:

1. Необходимость обеспечения максимальных темпов проходки выработки, что требует от комбайна максимальной производительности при допустимом уровне нагрузок в силовых системах.

2. Реализация требуемых темпов проходки (заданной теоретической производительности), при этом необходимо обеспечить максимально возможный ресурс комбайна за счет рационального нагружения силовых систем.

Таким образом, выбор критерия определяется производственной ситуацией, а система интеллекта, в свою очередь, должна обеспечивать эффективное управление по каждому из критериев.

Для проходческого комбайна избирательного действия эффективное управление процессом разрушения забоя требует решения следующих задач оптимизации рабочего процесса подсистемы «Исполнительный орган»:

1. Обеспечить оптимальные параметры режима разрушения забоя резцами исполнительного органа. Управляемыми параметрами при этом являются:

- скорости подачи и вращения резцовой коронки, определяющие соотношения толщины и ширины стружки на резцах коронки;
- глубина зарубки и шаг фрезерования в отдельных режимах разрушения забоя.

Скорости подачи и вращения резцовой коронки определяют соотношения толщины и ширины стружки, оказывая влияние на удельные энергозатраты и формирование нагрузок на отдельных резцах коронки. Глубина зарубки и шаг фрезерования формируют сечение забоя, обрабатываемого коронкой. Величина и форма сечения определяет объемы породы, разрушаемой отдельными резцами, что влияет на удельные энергозатраты процесса разрушения и динамичность нагрузок в целом на исполнительном органе.

2. Реализовать рациональную схему обработки забоя заданного сечения (траекторию движения исполнительного органа при обработке забоя). Схема обработки забоя формируется:

- последовательностью режимов разрушения забоя (например, для аксиальной коронки – фронтальная зарубка, боковой рез одной или двумя коронками, вертикальная зарубка), определяющих количество циклов низкочастотной составляющей нагрузки в силовых системах комбайна за цикл обработки забоя;

- длины резов в каждом режиме цикла разрушения забоя исполнительным органом. Эти параметры совместно со скоростями подачи определяют длительность цикла обработки забоя, а дополнительно с обрабатываемыми сечениями – теоретическую производительность комбайна. Длины резов однозначно определяются последовательностью режимов обработки забоя заданного сечения с соответствующими глубинами зарубки и шагами фрезерования, поэтому их не следует рассматривать как оптимизируемые параметры;

- глубиной зарубки и шагом фрезерования в отдельных режимах разрушения забоя, которые определяют количество циклов обработки забоя на один метр проходки и оказывают влияние на точность воспроизведения контура выработки.

3. Обеспечить минимальный перебор породы по контуру выработки. На точность воспроизведения заданного контура выработки оказывают влияние:

- моменты времени подачи команд управления перемещениями исполнительного органа при обработке забоя, которые должны определяться с учетом возможной частичной потери устойчивости комбайна, ограниченной видимости в рабочей зоне и инерционностью системы «оператор-машина»;

- глубиной зарубки и шагом фрезерования, которые определяют размеры неровностей на боковых стенках выработки, соответствующих форме коронки.

4. Обеспечить своевременную подачу управляющих воздействий системы интеллекта, компенсировав инерционность энергомеханической системы комбайна. Поступающие от оператора управляющие воздействия отрабатываются исполнительным органом с некоторым запаздыванием, обусловленным как инерционностью энергомеханической системы комбайна и его системы управления, так и скоростью отработки управляющих воздействий, обеспечивающей сглаживание переходных процессов. В результате несвоевременности выполнения управляющих воздействий возможны выходы режущего органа за требуемый контур выработки и разрушение забоя с нерациональными режимными параметрами, что оказывает существенное влияние на формирование нагрузок, особенно при переходе со слабой породы на крепкую. Обеспечить своевременную отработку управляющих воздействий возможно за счет:

- подачи управляющих воздействий с опережением по времени, что возможно ввиду повторяемости рабочих процессов комбайна от цикла к циклу. Это требует реализации адаптивных механизмов самообучения, позволяющих учесть изменчивость физико - механических свойств и структуры забоя в направлении проходки выработки;

- рациональной скорости отработки управляющих воздействий, обеспечивающей допустимый уровень нагрузок в переходных режимах работы комбайна при минимальной их длительности.

5. Выбрать рациональную диаграмму формирования импульсов и скорость регулирования для преобразователей частоты питающего

напряжения, обеспечивающих отсутствие резонансных явлений и допустимый уровень переходных нагрузок в силовых системах.

В таблице 1 сгруппированы управляемые параметры рабочего процесса подсистемы «Исполнительный орган» проходческого комбайна, значения которых определяются системой интеллекта в процессе решения задач оптимизации. Все параметры представляют собой вектора, компоненты которых соответствуют последовательным режимам разрушения забоя исполнительным органом.

Как видно из таблицы, большинство параметров определяются в процессе решения различных задач оптимизации, что требует их совместного решения либо декомпозиции. Поэтому для решения задач оптимизации рабочего процесса подсистемы «Исполнительный орган» требуется анализ целевых функций для каждой задачи.

Целевая функция является численным выражением критерия оптимизации, определяемого сложившейся производственной ситуацией (см. выше). Поэтому для каждой ситуации можно выделить соответствующую группу целевых функций для решения задач оптимизации.

Одновременное решение указанных задач затруднительно и нецелесообразно, так как среди них можно выделить первичные и вторичные, связанные и независимые. Возможно выполнить декомпозицию, предполагающую следующую последовательность решения задач:

1. Установление рациональных параметров режима разрушения забоя исполнительным органом для характерных зон забоя, имеющих различные физико-механические свойства. Одновременно решается задача выбора рациональной схемы обработки забоя. В качестве критериев оптимизации в зависимости от производственной ситуации принимаются темп проходки или ресурс комбайна.

Оценку ресурса можно осуществлять (в относительных единицах) по величине накопленной повреждаемости [9], рассчитываемой по формуле

$$НП(F) = \sum_{i=1}^n A_{Fi}^m,$$

где A_{Fi} – i -тая амплитуда нагрузки F ; m – показатель наклона кривой усталости; n – количество амплитуд нагрузки.

Таблица 1 – Оптимизируемые параметры рабочего процесса подсистемы «Исполнительный орган» проходческого комбайна

		Задачи оптимизации				
		режима разрушения забоя	схемы обработки забоя	перебора породы	отработки управляющих воздействий	диаграммы формирования импульсов
Параметры оптимизации	Скорость подачи \bar{V}_n	+				
	Угловая скорость коронки $\bar{\omega}$	+				
	Глубина зарубки \bar{B}	+	+	(+)		
	Шаг фрезерования $\bar{\Delta H}$	+	+	(+)		
	Последовательность обработки забоя \bar{P}		+			
	Опережение подачи управляющих воздействий $\bar{\Delta T}$			+	+	
	Скорость отработки управляющих воздействий \bar{V}_y			(+)	(+)	+
	Значения ширины импульсов диаграммы напряжения \bar{D}					+
Критерии оптимизации	Обеспечение максимальных темпов проходки выработки	$V_{np}(\bar{X}) \rightarrow \max$		$\Delta y(\bar{X}) \rightarrow \min$	$\bar{\Delta T} \rightarrow \min$	$\bar{V}_y \rightarrow \min$
	Реализация требуемых темпов проходки при максимально возможном ресурсе	$M_{и \max}(\bar{X}) \rightarrow \min$				

Примечание. + - параметр влияет на результат оптимизации и определяется в ходе ее решения; (+) - параметр влияет на результат оптимизации, но определяется в ходе решения другой задачи

Анализ приведенной зависимости показывает, что наиболее действенным путем повышения ресурса комбайна является снижение величины амплитуды нагрузки.

Расчет накопленной повреждаемости по величинам нагрузок, а не по напряжениям, действующим в металлоконструкции, возможен ввиду линейной зависимости между ними. В качестве примера на рис. 1 приведены зависимости эквивалентных напряжений в наиболее нагруженных зонах корпуса редуктора привода исполнительного органа комбайна КПД от относительного значения максимального момента сопротивления на валу двигателя привода резания (за базу принят номинальный момент двигателя). Номера кривых соответствуют номерам зон на рис. 2. Расчет напряжений выполнен методом конечных элементов. На рис. 2 и приведено распределение эквивалентных напряжений и пронумерованы зоны с максимальными напряжениями для режима вертикальной зарубки.

Нагрузки на конструкцию - составляющие вектора внешнего возмущения на исполнительном органе – были получены с использованием математической модели процесса разрушения забоя механическим проходческим комбайном [10].

Анализ результатов подобных расчетов позволяет выявить места установки тензодатчиков [4], что даст возможность системе интеллекта контролировать максимальные значения напряжений в металлоконструкции комбайна и прогнозировать ее остаточный ресурс.

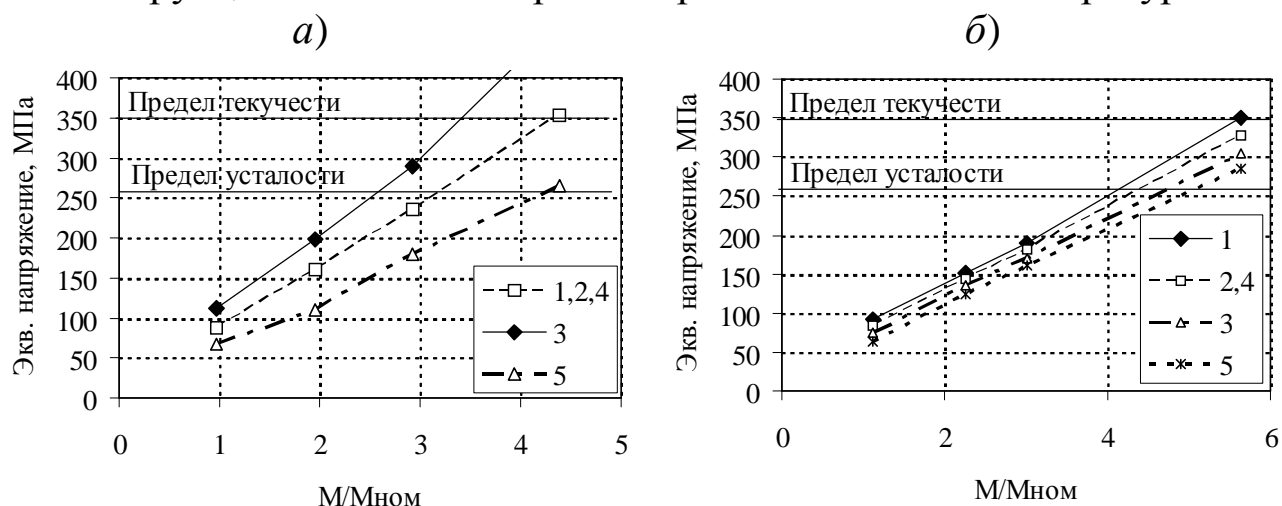


Рисунок 1 – Зависимости эквивалентных напряжений в наиболее нагруженных зонах корпуса редуктора привода исполнительного органа комбайна КПД от относительного значения максимального момента сопротивления на валу двигателя привода резания:
а – в режиме бокового реза; *б* – в режиме вертикальной зарубки

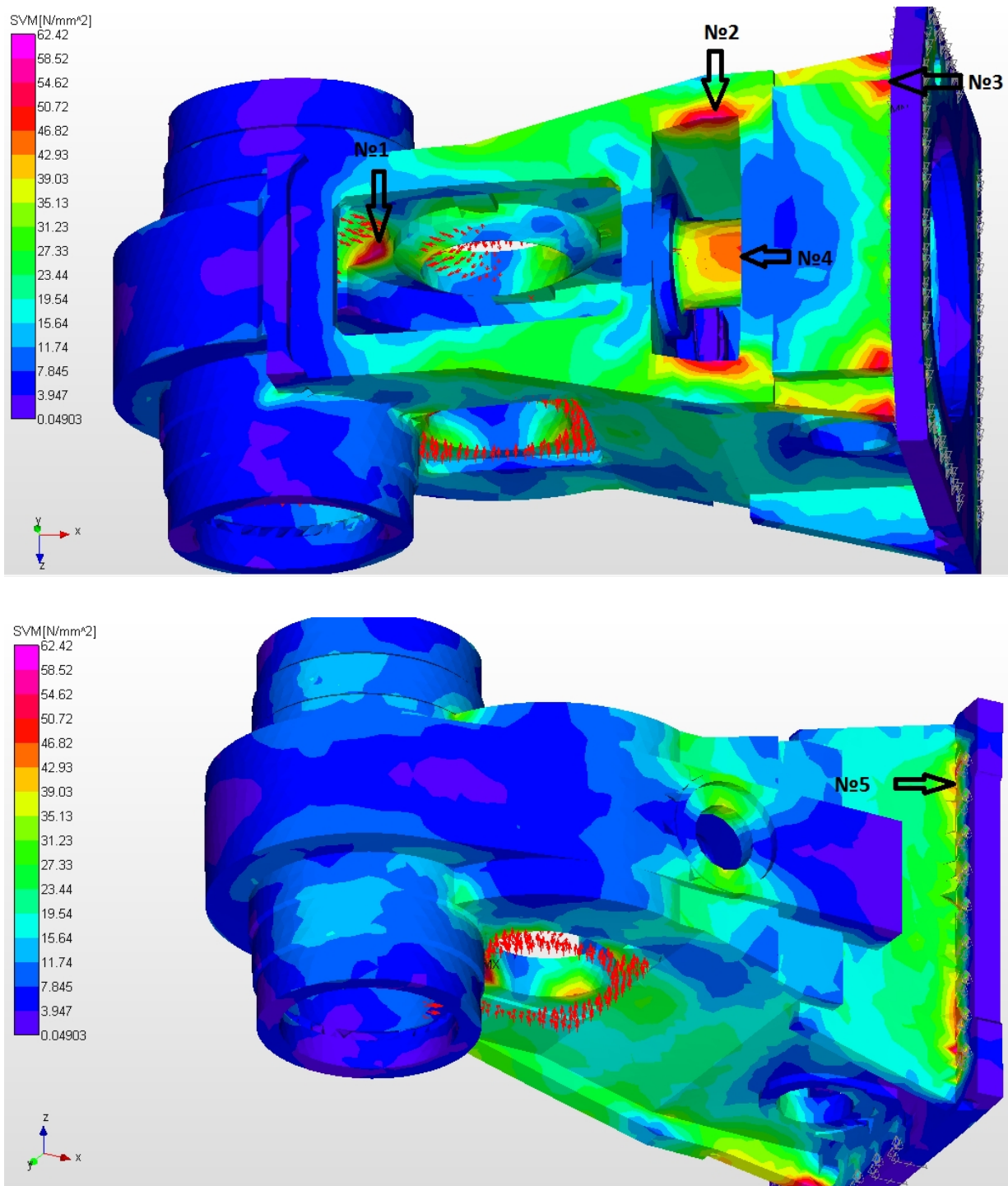


Рисунок 2 – Распределение напряжений в корпусе редуктора исполнительного органа комбайна КПД в режиме вертикальной зарубки

В работе [5] установлено, что при показателе степени кривой усталости $m=9$ низкочастотная составляющая нагрузки, вызванная переходами из режима в режим разрушения забоя, оказывает определяющее влияние на накопленную повреждаемость в большинстве элементов конструкции. Это позволяет существенно упростить расчет накопленной за цикл обработки забоя повреждаемости, то есть

вести его по известным максимальным и минимальным значениям нагрузки в каждом режиме с учетом только их последовательности при заданной схеме обработки забоя. Таким образом, из расчета исключаются малые амплитуды нагрузок, формирующиеся в каждом отдельном режиме разрушения забоя, которые, как правило, ниже предела усталости материала. Для примера, сталь 35ФАЛ, используемая для литых металлоконструкций комбайнов имеет предел текучести 350 МПа, а предел усталости – 260 МПа. Относительно высокий предел усталости приводит к тому, что даже некоторые амплитуды нагрузок, обусловленные сменой режимов разрушения забоя, приводят к формированию амплитуд напряжений, не превышающих предела усталости. Учет таких амплитуд нагрузок при расчете накопленной повреждаемости приводит к некоторому занижению расчетного ресурса, что допустимо, так как обеспечивает запас долговечности конструкции. Кроме того, такой анализ позволяет выявить режимы, в большей степени определяющие долговечность элементов металлоконструкции.

Например, для рассмотренной корпусной детали таким режимом будет боковой рез (рис. 1).

Очевидно, чем ниже и равномернее будет нагрузка в элементах конструкции, тем ниже величина накопленной повреждаемости. Нагрузки в элементах конструкции комбайна формируются под действием вектора внешнего возмущения на исполнительном органе, компонентами которого являются проекции главного вектора системы сил на резцах и момент сопротивления на оси коронки. Как известно, между проекциями главного вектора и моментом сопротивления существует корреляционная связь. Таким образом, в качестве целевой функции при оптимизации по критерию ресурса может быть принят максимальный момент сопротивления на исполнительном органе за цикл обработки забоя.

2. Установление рациональных по критерию ресурса значений скорости отработки управляющих воздействий \bar{V}_y и ширин импульсов диаграммы напряжения $\bar{D}\{\Delta t_u, n_{umr}\}$ [11] при частотном регулировании приводного двигателя. При изменении частоты питающего напряжения в приводе возникает переходной процесс, сопровождающийся формированием динамических нагрузок. Очевидно, желательно иметь минимальное время переходного процесса при допустимом уровне нагрузок. Поэтому в качестве целевой функции следует принять скорость отработки управляющих воздействий $\bar{V}_y \rightarrow \max$ при

ограничении коэффициента неравномерности нагрузки (момента сопротивления на валу двигателя) $k_{нд}(\bar{X}) < [k_{нд}]$.

3. Установление рациональных по критерию перебора породы значений опережения подачи ΔT управляющих воздействий при обработке забоя вблизи заданного контура выработки. Глубина зарубки \bar{B} и шаги фрезерования ΔH , также влияющие на величину перебора, принимаются по результатам решения предыдущей задачи. Снижение перебора дает положительный эффект при решении любой из двух рассмотренных производственных задач. Поэтому в качестве целевой функции может быть принята величина выхода исполнительного органа за заданный контур выработки в каждом резе $\Delta y(\bar{X}) \rightarrow \min$.

4. Установление рациональных по критерию ресурса значений опережения подачи ΔT управляющих воздействий при обработке забоя вблизи граничных зон между пластами забоя различной прочности. При переходе с более слабой на более крепкую породу со значительными величинами скорости подачи и толщины среза на резцах возникают пиковые нагрузки, обусловленные инерционностью системы и запаздыванием изменения толщины среза относительно скорости подачи. Опережения в подаче управляющих воздействий позволяют исключить эти пиковые нагрузки. При определенных значениях ΔT выход на более крепкую породу происходит уже с требуемыми значениями параметров режима разрушения. Дальнейшее увеличение ΔT нецелесообразно, так как уже не приводит к снижению пиковой нагрузки в пределах рассматриваемого реза, в то же время увеличивается длительность цикла обработки забоя. Поэтому в качестве целевой функции следует принять опережение подачи управляющих воздействий $\Delta T \rightarrow \min$ при соответствующем ограничении по максимальной нагрузке (моменту сопротивления на оси коронки) при переходе граничной зоны.

С учетом выполненной декомпозиции были разработаны математические модели и методы решения приведенных задач адаптивной оптимизации, реализация которых позволяет (установлено методом имитационного моделирования [8, 10,12]): снизить требования к мощности привода исполнительного органа и массе комбайна на 40-60 % для всего диапазона применения комбайнов с резцовым рабочим инструментом; при характерных для существующих комбайнов параметрах повысить месячный темп проходки от 30% до 90%. Эффект усиливается для выработок большего сечения (примерно про-

порціоноально увеличению сечения) и практически не зависит от длины проходимой выработки.

Выводы и направления дальнейших исследований.

Обеспечение высоких показателей производительности и ресурса при приемлемых уровнях металлоемкости и энерговооруженности выемочных машин может быть достигнуто путем их оснащения интеллектуальной системой управления, которая на основе текущей информации о состоянии силовых систем машины и данных о параметрах внешней среды реализует адаптивную оптимизацию рабочего процесса комбайна к конкретным условиям эксплуатации с учетом изменяющихся в процессе функционирования горно-геологических условий и параметров комбайна. Для мехатронного проходческого комбайна избирательного действия эффективное управление процессом разрушения забоя требует решения связанных задач адаптивной оптимизации параметров режима разрушения и схемы обработки забоя исполнительным органом, перебора породы по контуру выработки и отработки управляющих воздействий. Выполнена декомпозиция указанных задач, что позволяет осуществлять их решение на этапе функционирования комбайна на основе частных математических моделей и алгоритмов оптимизации, для которых разработаны целевые функции оптимизации при двух возможных производственных ситуациях - необходимости обеспечения максимальных темпов проходки либо реализации требуемых темпов проходки при максимально возможном ресурсе комбайна.

Список литературы

1. Перспективы развития проходческих комбайнов / А.К. Семенченко, О.Е. Шабаев, Д.А. Семенченко, Н.В. Хиценко // Горная техника 2006: Каталог-справ. – СПб: ООО «Славутич», 2006. – С. 8-15.
2. Стадник Н.И. Мехатроника в угольном машиностроении / Н.И. Стадник, А.В. Сергеев, В.П. Кондрахин // Горное оборудование и электротехника. – 2007. – Вып. 4. – С. 20–29.
3. Горбатов П.А. Выемочные комбайны нового поколения как энергетические системы мехатронного класса / П.А. Горбатов, В.В. Косарев, Н.М. Лысенко. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – 176 с.
4. 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. – 2010. – №1. – С. 68-77.
5. К определению исходных данных для расчета элементов горной машины на выносимость / А.К. Семенченко, О.Е. Шабаев, А.А. Каплюхин и др. // Наукові праці ДонНТУ. – 2006. – Вип. 104. – С. 176–182.
6. Гуляев В.Г. Концепция вероятностного метода расчета усталостной прочности трансмиссий выемочных комбайнов / В.Г. Гуляев, В.П. Кондрахин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо–електромеханічна. – 2007. – Вип. 127. – С. 101–111.

7. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М., 1984. – 312 с.
8. 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.
9. 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. – 302 с.
10. Моделирование рабочего процесса проходческого комбайна как мехатронного объекта / О.Е. Шабаев, Н.В. Хиценко, Н.И. Стадник, В.А. Мизин // Вісті Донецького гірничого ін-ту. – 2011. – №1. – С. 72-83.
11. Шабаев О.Е. Математическая модель рабочего процесса частотно регулируемого привода мехатронного выемочного комбайна / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія гірничо-електромеханічна. – 2009. – Вип. 17 (157). – С. 266-273.
12. 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.

Стаття надійшла до редакції 24.10.2012

О.Е. Шабаев. Донецький національний технічний університет

Обґрунтування вимог і критеріїв адаптивного оптимального управління робочим процесом прохідницьких комбайнів

Визначено завдання адаптивної оптимізації робочого процесу прохідницького комбайна, вирішення яких має здійснюватися в процесі його функціонування. Для цих задач обґрунтовано критерії та параметри оптимізації, виконана декомпозиція та запропоновано алгоритм вирішення системою інтелекту комбайна. Встановлено, що адаптивна оптимізація робочих процесів прохідницького комбайна дозволяє забезпечити високі темпи проходки (300 м / міс. та більше) при знижених на 40-60% вимогах до потужності привода виконавчого органа і масі комбайна.

Ключові слова: мехатроніка, прохідницький комбайн, синтез, цільова функція, адаптація, темп проходки, ресурс

O. Shabayev. Donetsk National Technical University

Requirements and Criteria of Adaptive Optimal Control of Roadheader's Operation Process.

The paper discusses the problems of adaptive optimization of a roadheader's operation process. We found out that adaptive optimization provides high tunneling speed (300 m/month), while the requirements to driving power and roadheader mass are reduced by 40-60%.

Keywords: mechatronics, road-header, synthesis, objective function, adaptation, tunneling speed, resource.