

## НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ КАК МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Шабаев О.Е., докт. техн. наук, проф.  
Донецкий национальный технический университет

*Разработана математическая модель синтеза горной выемочной машины как мехатронного объекта. Модель позволяет осуществлять обоснование рациональных структуры, параметров и алгоритма функционирования комбайна, а также адаптацию параметров и алгоритмов системы интеллекта машины к условиям эксплуатации.*

МЕХАТРОНИКА, ПРОХОДЧЕСКИЙ КОМБАЙН, СИНТЕЗ,  
ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ, АДАПТАЦИЯ, ТЕМП ПРОХОДКИ, РЕСУРС

### **Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.**

Успешное решение проблемы энергоснабжения страны может быть обеспечено на основе эффективной разработки собственных запасов угля путем резкого снижения себестоимости его добычи. Это может быть достигнуто на основе внедрения качественно новой горной техники, которая отличается значительным повышением производительности, надежности и безопасности использования, а также снижением эксплуатационных затрат и энергопотребления на разрушение.

Основным фактором, сдерживающим рост нагрузки на современные добычные комплексы, является отставание в подготовке нового фронта очистных работ. Накопленный опыт показывает, что выемочный столб длиной 1,2- 2 км с запасом 0,6-1,0 млн. т. отрабатывается за 8-14 месяцев. За это время для подготовки нового выемочного столба нужно пройти в среднем 3-5 км подготовительных выработок. Эта задача реально выполнима при проходке горных выработок с темпами 400-600 м/месяц.

В течение последних лет (2000÷2007г.г.) средние темпы подвигания очистных забоев 44,6м/мес. опередили среднюю скорость проведения вскрывающих и подготовительных выработок - 44,1м/мес. [1]. Хотя ещё совсем недавно темпы проведения подготовительных выработок опережали темпы подвигания очистных забоев (см. рис.1). Еще больший разрыв отмечен в темпах подвигания механизированных забоев с крепями нового технического уровня, где опережение в 2007г. составило 37,8 % при средних темпах подвигания этих лав 60,8м/мес.

Существенное отставание скоростей проведения выработок от темпов подвигания механизированных забоев приводит к тому, что в настоящее время значительное количество шахт не успевает своевременно воспроизводить очистную линию забоев взамен отрабатываемой, что в итоге, без принятия соответствующих мер, может привести к существенному уменьшению объёмов добычи угля. Это, в свою очередь,

является сдерживающим фактором дальнейшего совершенствования очистной техники.

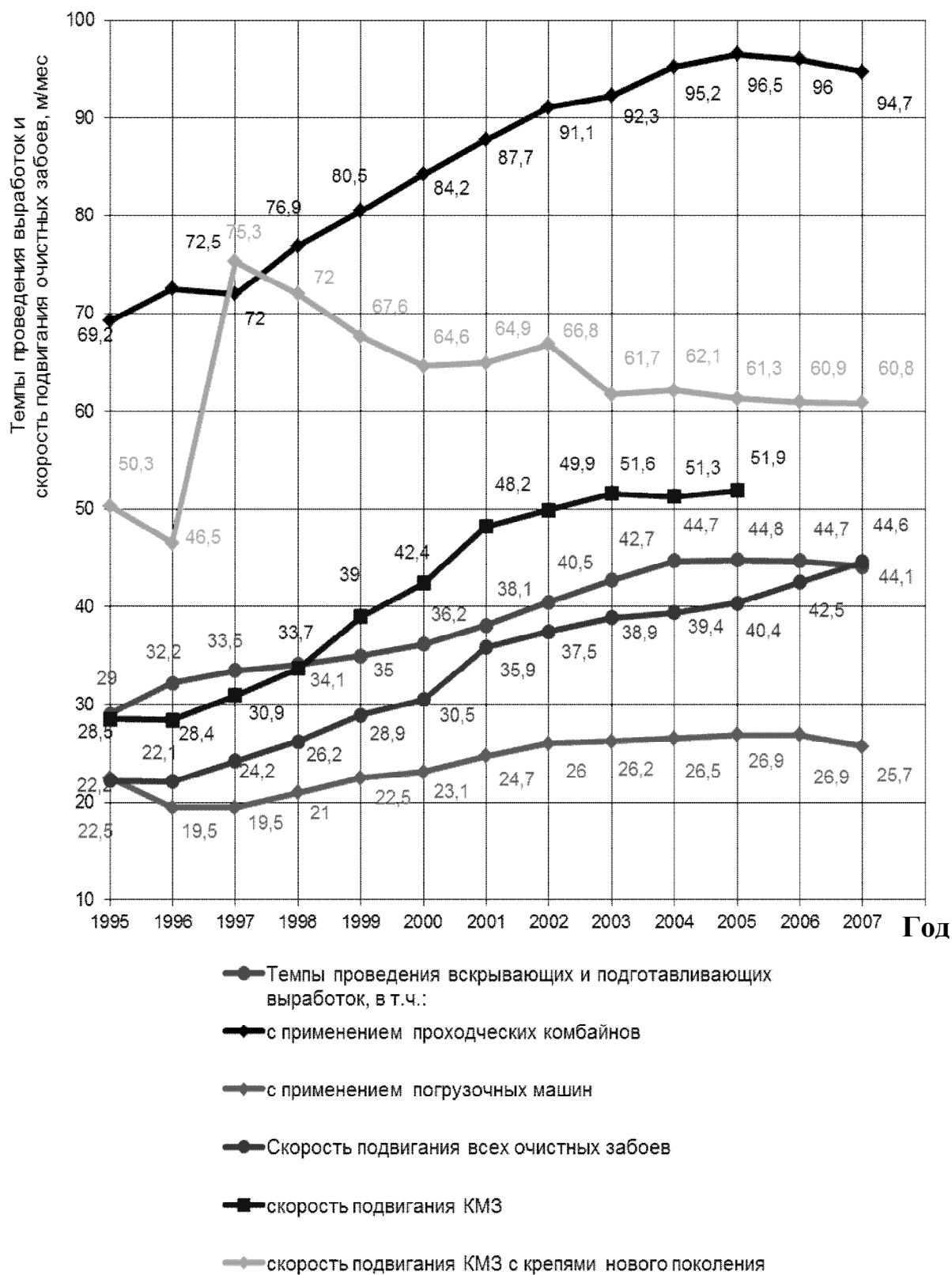


Рисунок 1 – Динамика темпов проведения выработок и скорости подвигания очистных забоев

Для этого технология ведения горных должна предусматривает максимальное использование потенциальных возможностей техники, а техника, в свою очередь, должна быть максимально адаптирована под горно-геологические и горнотехнические условия шахт.

Экспериментальные исследования по установлению закономерностей рабочих процессов проходческого комбайна КПД [2] показали, что потенциальные возможности машины не используются в полной мере (см. рис.2). Так, средняя за цикл обработки забоя производительность разрушения горного массива обеспечивается на уровне в среднем 38% и не более 60%

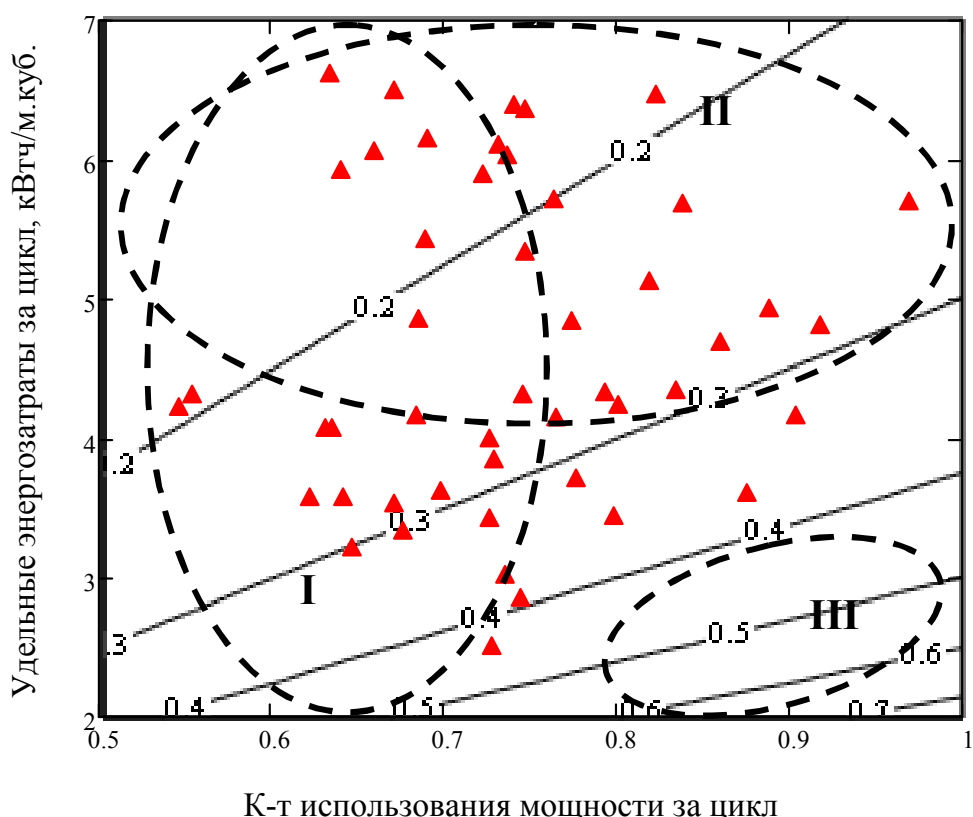


Рисунок 2 - Поле значений средней за цикл обработки забоя теоретической производительности процесса разрушения забоя в зависимости от коэффициента использования мощности и удельных энергозатрат

от возможной. Это обусловлено неучетом при ручном управлении комбайном целого ряда особенностей конструкции и процесса его функционирования, приводящему к существенному отклонению от рациональных режимов обработки забоя (зона II), недостаточного использования мощности привода (зона I) и перебора породы по контуру выработки. Вместе с тем, в зоне III, соответствующей наиболее эффективной работе, проходческий комбайн практически не эксплуатируется.

Передовой мировой опыт в области машиностроения показывает, что добиться качественно новых характеристик оборудования позволяет

мехатронная концепция системного объединения энергомеханических систем с компьютерными устройствами управления, встроенными датчиками и интерфейсами. Создание высокоэффективных и конкурентоспособных горных машин может быть обеспечено на основе компьютерных технологий оптимального проектирования, основу которых составляют методы и математические модели оптимизации, учитывающие особенности функционирования этих машин как объектов проектирования.

**Анализ исследований и публикаций.** В работах [3, 4] разработана достаточно общая математическая модель многокритериального синтеза горных выемочных машин как пространственных многомассовых динамических систем переменной структуры. Согласно [2] синтез горных машин должен рассматриваться как задача оптимизации по векторному критерию, компонентами которого являются: вектор критериев, определяющих энергопотребление; вектор критериев, определяющих производительность; вектор критериев, определяющих ресурс работы; вектор критериев, определяющих металлоемкость. Применительно к проходческим комбайнам известны работы [3, 4]. Наиболее эффективной является разработка проходческого комбайна для конкретных условий эксплуатации, однако на практике такой подход не применяется, так как требует проведения опытно-конструкторских работ с реализацией натурального эксперимента по установлению закономерностей процесса разрушения рабочим инструментом комбайна для каждого конкретного забоя. Как следствие, проектирование комбайна осуществляется для определенного проектного диапазона условий эксплуатации. При этом определяются структура и параметры комбайна, позволяющие обеспечить наиболее эффективный рабочий процесс машины по заданным критериям. Так как имеет место диапазон условий эксплуатации, используют следующие подходы:

- оценка значений критериев для различных возможных комбинаций условий эксплуатации с последующим расчетом средних или гамма-процентных значений критериев. Для проходческих комбайнов такой подход предложен в работе [5];

- оценка значений критериев для «представительных» условий - усредненных либо наиболее тяжелых с определенной доверительной вероятностью, например, работа [4].

Вместе с тем, эти модели оптимизации не в полной мере учитывают следующие особенности мехатронных выемочных машин, обусловленные интеллектуализацией рабочих процессов и синергетическим объединением механических, электротехнических, гидравлических, электронных и информационных компонент:

- сложность одновременного (параллельного) проектирования механических, электротехнических, гидравлических, электронных и информационных компонент мехатронной машины;

- возможность адаптации машины к изменчивым и случайным условиям эксплуатации на основе ее самообучения с использованием установленных в процессе наладки закономерностей рабочих процессов;
- возможность реализации более сложных алгоритмов функционирования по сравнению с известными выемочными машинами с ручным и автоматизированным управлением;
- необходимость оснащения элементов силовых систем интегрированными датчиками, обеспечивающими оперативный сбор информации о состоянии этих элементов и рабочих процессах машины.

**Постановка задачи.** Таким образом, целью работы является повышение технического уровня проходческих комбайнов на основе развития теоретических основ многокритериального синтеза горных машин как мехатронных систем.

**Изложение материала и результаты.**

Особенностью задачи адаптивной оптимизации мехатронного проходческого комбайна является невозможность ее решения до начала эксплуатации комбайна в конкретных горно-геологических условиях. Адаптивная оптимизация осуществляется под управлением системы интеллекта комбайна на основе разработанных в [6-9] математических моделей и методов на стадии самообучения и в процессе дальнейшей эксплуатации. Поэтому математическая модель многокритериального синтеза мехатронного проходческого комбайна может быть записана:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{Найти } \bar{X} \{C, f_{СИ}(), P\}, \\
 \text{при котором } \bar{K}_{св}(\bar{X}, \bar{C}) \rightarrow \text{extr}, \\
 \text{при ограничениях} \\
 a_m \leq X_m \leq b_m, \quad (m = \overline{1, N_m}), \\
 g_q(\bar{X}, \bar{C}) \leq 0, \quad (q = \overline{1, N_q}), \\
 X_p - \text{дискретные}, \quad (p = \overline{1, N_p}) \\
 \\
 \text{Найти } \bar{X}_r, \quad (r = \overline{1, N_{зао}}) \\
 \text{при котором } K_r(\bar{X}_r, \bar{C}_r) \rightarrow \text{extr}, \\
 \text{при ограничениях} \\
 a_{rm_r} \leq X_{m_r} \leq b_{rm_r}, \quad (m_r = \overline{1, N_{m_r}}),
 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} g_{q_r}(\bar{X}_r, \bar{C}_r) \leq 0, \\ X_{P_r} - \text{дискретные}, \end{array} \right. \quad (q_r = \overline{1, N_{q_r}}), \quad (p_r = \overline{1, N_{p_r}})$$

где  $\bar{X}\{ \}$  - вектор переменных проектирования;  $C$  - структура системы "машина - внешняя среда" (S-модель), позволяющая реализовать заданные в техническом задании функции (F-модель);  $f_{СИ}(O)$  - алгоритм функционирования комбайна, реализуемый системой его интеллекта в процессе работы [10], включая алгоритмы адаптации;  $\bar{P}$  - вектор параметров, компонентами которого являются как параметры элементов силовых систем, так и системы управления, в том числе – места установки и параметры интегрированных в элементы конструкции датчиков;  $\bar{K}_{св}(O)$  - вектор качества;  $\bar{C}\{C_{ср}, \bar{P}_{ср}\}$  - вектор постоянных проектирования: структура внешней среды  $C_{ср}$  и вектор параметров внешней среды  $\bar{P}_{ср}$ ;  $a_m, b_m$  - предельные значения  $m$ -й переменной проектирования  $X_m$ ;  $g_q(O)$  -  $q$ -тое функциональное ограничение;  $r$  - номер решаемой задачи адаптивной оптимизации ( $N_{зао}$  - количество задач).

Каждая  $r$ -тая задача адаптивной оптимизации имеет свои вектор оптимизируемых параметров  $\bar{X}_r$  и целевую функцию  $K_r$ :

- для задач оптимизации цикла обработки и параметров режима разрушения забоя ( $r = 1$ ):

$\bar{X}_1\{B, \Delta H_i, N, V_{nij}, \omega_{ij}, i_{фз}, n_{фз}, V_{нвзij}, \omega_{взij}\}$  - соответственно глубина зарубки исполнительного органа; шаги фрезерования и количество  $N$  горизонтальных резов; скорости подачи и вращения коронок при разрушении  $j$ -го пласта в процессе  $i$ -го реза; номер горизонтального слоя, в который осуществляется фронтальная зарубка и количество боковых резов, за которое вынимается данный слой; скорости подачи и вращения коронок при вертикальной зарубке в  $j$ -й пласт  $i$ -го слоя;

$K_1$  - темп проходки выработки  $V_{np}$  или максимальный момент сопротивления на валу двигателя привода резания за цикл обработки забоя  $M_{цmax}$ ;

- для задачи адаптивной оптимизации отработки управляющих воздействий ( $r = 2$ ):

$\bar{X}_2\{\Delta T_k\}$  и  $K_2 = \Delta T_k$ , где  $\Delta T_k$  - опережение подачи управляющего воздействия в  $k$ -той переходной зоне;

- для задачи адаптивной оптимизации перебора породы ( $r = 3$ ):

$\bar{X}_3 \{ \Delta T_k \}$  - опережение подачи управляющего воздействия в  $k$ -той зоне подхода исполнительного органа к контуру выработки за цикл обработки забоя;

$K_3 = \Delta y_k$  - величина выхода коронки за требуемый контур выработки в  $k$ -той зоне.

Оптимизируемые на этапе адаптации параметры режима работы  $\bar{X}_r$  совместно с алгоритмом работы комбайна  $A$ , заложенным на этапе проектирования в систему интеллекта, позволяют в процессе работы на основании показаний датчиков  $\bar{\mu}$  вырабатывать управляющие воздействия на энергораспределители и регуляторы силового привода  $\bar{\lambda}$ .

Таким образом, разработана математическая модель многокритериального синтеза мехатронного проходческого комбайна, позволяющая определять рациональную структуру, параметры и алгоритмы функционирования комбайна, а также параметры режима разрушения забоя. Отличительными особенностями модели от приведенных в работах являются:

- двухэтапность оптимизации - на этапе проектирования комбайна осуществляется обоснование рациональных структуры, параметров и алгоритма функционирования комбайна, а на этапе эксплуатации – максимально эффективных в конкретных условиях параметров режима разрушения забоя;

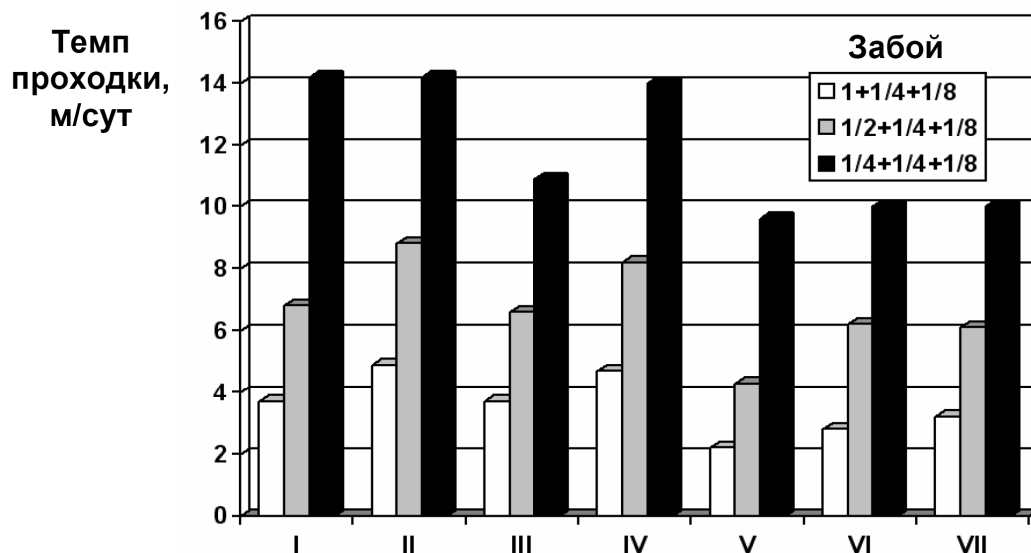
- оптимизация на первом этапе осуществляется по средневзвешенному значению критерия с учетом вероятностного характера условий эксплуатации;

- одна из переменных проектирования на первом этапе оптимизации – алгоритм функционирования комбайна  $f_{СИ}()$  с учетом особенностей его структурной схемы и требований горного производства;

- адаптивная оптимизация режимных параметров на втором этапе к конкретным условиям эксплуатации, а также изменяющимся в процессе работы параметрам комбайна.

Апробация разработанной модели синтеза выполнялась на основе модельных исследований, путем сравнения показателей рабочего процесса комбайна типа КПД до и после решения соответствующих задач адаптивной оптимизации. При этом использовались ММ анализа рабочего процесса проходческого комбайна как мехатронного объекта [11] и ММ адаптивной оптимизации [6-9].

Установлено, что применение принципов адаптивной оптимизации цикла обработки и параметров режима разрушения забоя исполнительным органом позволяет обеспечить для проходческого комбайна повышение темпов проходки в 1,4-2,5 раза (рис. 3).



**Принцип управления:**

- |   |   |
|---|---|
| I - адаптивное, $\Delta H \rightarrow s$ , $\omega = var$     | V - автоматизир., $\Delta H \rightarrow s$ , $\omega = const$ |
| II - адаптивное, $s \rightarrow \Delta H$ , $\omega = var$    | VI - ручное, $\Delta H \rightarrow s$ , $\omega = const$      |
| III - адаптивное, $\Delta H \rightarrow s$ , $\omega = const$ | VII - ручное, $s \rightarrow \Delta H$ , $\omega = const$     |
| IV - адаптивное, $s \rightarrow \Delta H$ , $\omega = const$  |   |

Рисунок 3 - Эффективность использования комбайном (темп проходки) в зависимости от принципов его управления

Рост темпов проходки обеспечивается за счет максимальной и равномерной загрузки привода по мощности в пределах цикла; более полного использования номинальной (тепловой) мощности приводного двигателя за цикл обработки забоя; более эффективного по энергозатратам режима разрушения забоя боковым резом; максимальным использованием устойчивого момента в каждом резе; максимальным использованием глубины зарубки исполнительного органа; с учетом альтернатив регулирования нагрузки как за счет высоты слоя, так и за счет скоростей подачи и вращения коронок. Адаптивный алгоритм управления, реализующий разрушение забоя с максимальными скоростями подачи ( $s \rightarrow \Delta H$ ) более эффективен, чем с максимальными сечениями ( $\Delta H \rightarrow s$ ). При этом регулирование частоты вращения коронок ( $\omega = var$ ) не дает существенного эффекта по сравнению с работой при постоянной скорости ( $\omega = const$ ).

Установлено, что технический темп проходки (при неизменном принципе управления) существенно влияет на ресурс элементов конструкции комбайна (рис. 4). Данный эффект усиливается при увеличении прочности разрушаемых пород.

Поэтому работа с завышенной технической производительностью и последующими простоями является нецелесообразной, особенно при разрушении крепких пород. Для комбайна типа КПД в представительных условиях эксплуатации адаптивный принцип управления по сравнению с автоматизированным позволяет существенно повысить ресурс: для элементов металлоконструкции – до 50-132 раз, для элементов



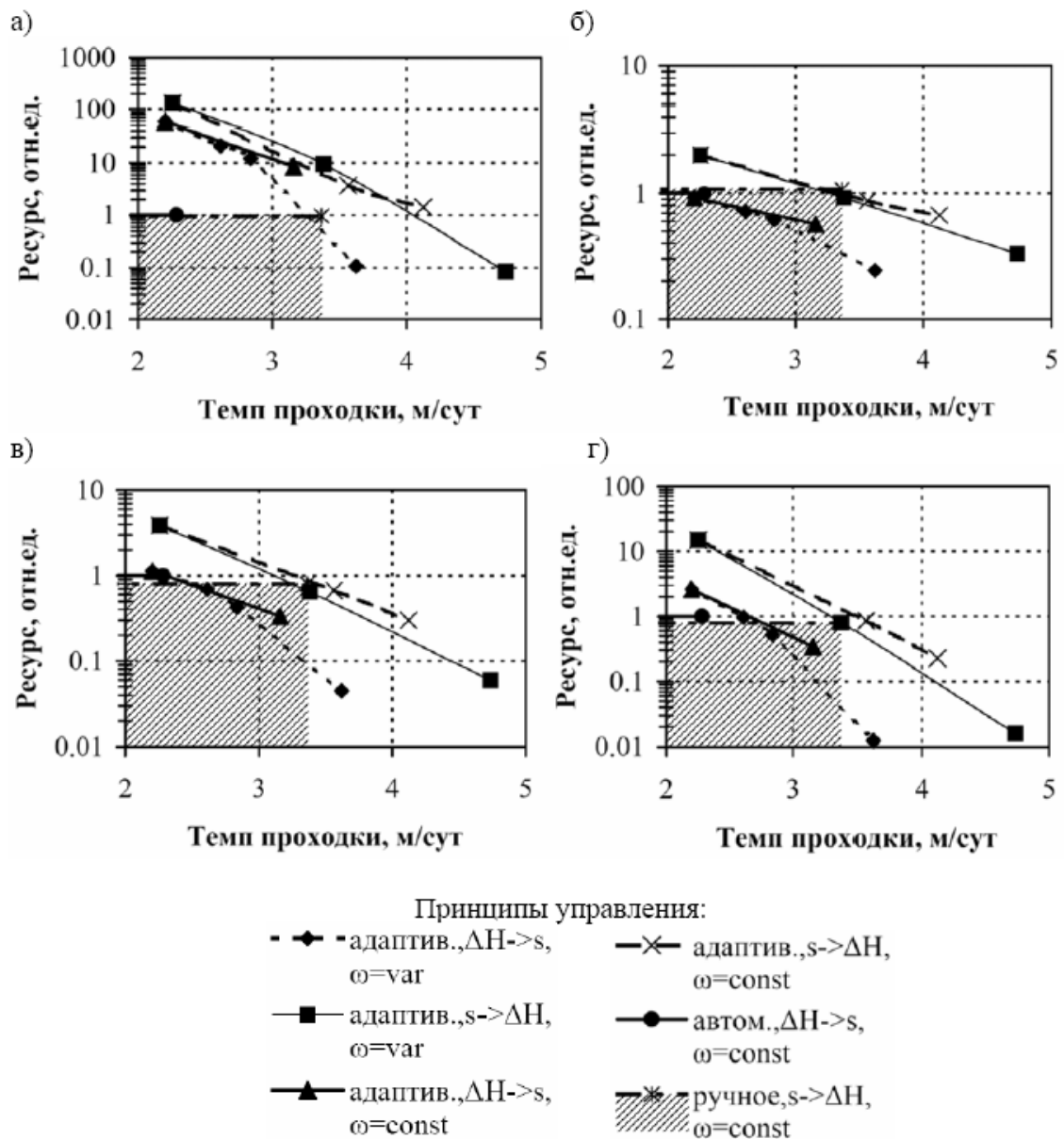
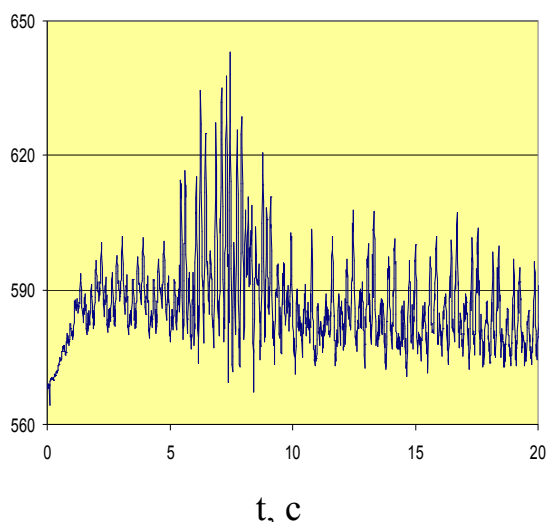


Рисунок 4 - Влияние принципа управления комбайном на ресурс корпусных элементов металлоконструкции (а,  $m = 9$ ) и привода исполнительного органа (б –  $m = 3,33$ , в –  $m = 6$ , г –  $m = 9$ )

трансмиссии: подшипников - до 2,0 раз; зубчатых колес (контактная усталость) и коротких валов – в 1,1-5,6 раза; зубчатых колес (изгибная усталость) и длинных валов – в 2,6-28 раз. Эффект достигается путем обеспечения заданного темпа проходки с учетом фактического значения коэффициента машинного времени комбайна, равномерной загрузки привода по максимальному моменту в каждом режиме цикла при максимально возможной глубине зарубки; обеспечение эквивалентной по нагреву мощности приводного двигателя за цикл обработки забоя не более номинальной, с учетом альтернатив регулирования нагрузки как за счет высоты разрушаемого слоя, так и за счет скоростей подачи и вращения коронок.

Установлено, что адаптивная оптимизация обработки управляющих воздействий позволяет получить существенное повышение ресурса элементов конструкции проходческого комбайна (накопленная повреждаемость в корпусных конструкциях снижается в 7-30 раз). При этом эксплуатационная производительность вследствие повышения ресурса машины и снижения потерь рабочего времени на устранение отказов также увеличивается на величину до 3,5%. Эффект достигается за счет прогноза и выбора необходимого опережения по времени начала изменения скорости подачи исполнительного органа до обработки комбайном переходного участка забоя переменной прочностной структуры. В результате исключаются пиковые нагрузки на элементы конструкции комбайна (см. рис. 5: а – без адаптации; б – с адаптацией).

а) Р, кН



б) Р, кН

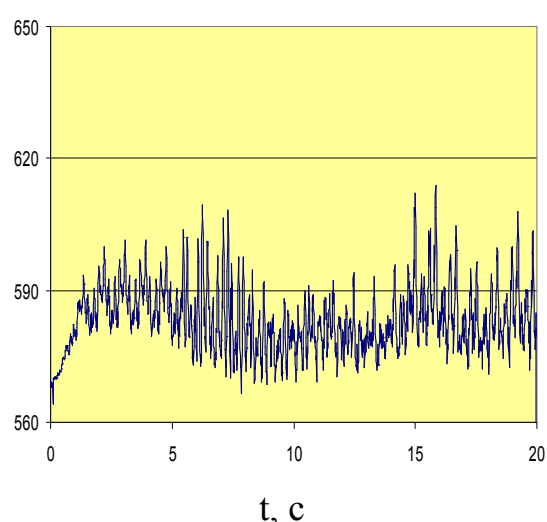


Рисунок 5 – Изменение нагрузки в шарнире подвески поворотной рамы исполнительного органа в переходной зоне с регулятором рабочего объема насоса (а) и с адаптивной оптимизацией обработки управляющих воздействий (б)

Применение адаптивной оптимизации перебора породы по контуру выработки позволяет компенсировать влияние частичной потери устойчивости машины и инерционности подсистемы «исполнительный орган» проходческого комбайна. По результатам модельного эксперимента установлено, что инерционность подсистемы «исполнительный орган» проходческого комбайна обуславливает переборы породы за проектный контур выработки величиной до 55 мм. Величина перебора зависит от инерционности управляющей системы, инерционности самого комбайна и его исполнительного органа, а также от физико-механических свойств горного массива. Адаптивная оптимизация перебора породы позволяет свести перебор породы практически до нуля, что позволяет сократить непроизводительные расходы электроэнергии, ресурса комбайна и снизить себестоимость проходческих работ.

### ***Выводы и направления дальнейших исследований***

Разработана математическая модель синтеза горной выемочной машины как мехатронного объекта, отличающаяся тем, что процесс синтеза выполняется в два этапа: на первом этапе на стадии проектирования машины осуществляется обоснование рациональных структуры, параметров и алгоритма функционирования комбайна, а на втором в процессе обучения и эксплуатации машины осуществляется корректировка параметров и алгоритмов системы интеллекта машины. Реализация второго этапа синтеза интеллектуальной системой управления комбайна позволит существенно повысить эффективность использования его потенциальных возможностей, что может быть использовано как для повышения показателей эффективности (темпа проходки и ресурса), так и для снижения требований к металлоемкости и энерговооруженности конструкции комбайна.

### **Список литературы:**

1. Косарев В.В. Новая горная техника ГП «Донгипроуглемаш» для подземной добычи угля // Решение научно–технических проблем при создании и внедрении современного горно–шахтного оборудования: Зб. наук. праць. – Донецьк: ГП Донгипроуглемаш, 2008. – Вип. 113. – С. 37–61.
2. Результаты экспериментальных исследований рабочего процесса проходческого комбайна КПД /Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В., Стадник Н.И. // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк, 2010. - Вип. 18(172). - С. 97-111.
3. Семенченко А.К., Кравченко В.М., Шабаев О.Е. Теоретические основы анализа и синтеза горных машин и процесса их восстановления как динамических систем. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2002. – 302с.
4. Горбатов П.А., Косарев В.В., Лысенко Н.М. Выемочные комбайны нового поколения как энергетические системы мехатронного класса. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – 176 с.
5. Семенченко А.К., Хиценко Н.В. Оценка эффективности способов регулирования нагрузки на привод резания комбайна типа П110 в условиях Донбасса // Вісті Донецького гірничого інституту. - 2004. - №2 - С. 109-115..
6. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко 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., Хиценко 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.
8. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Степаненко Е.Ю., Хиценко Н.В. Оценка эффективности проходческого комбайна с интеллектуальной системой "управление-подача" исполнительного органа. - Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю, №1, 2009. - С. 207-218.
  9. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В., Степаненко Е.Ю. Мехатронная система подачи исполнительного органа проходческого комбайна с интеллектуальным модулем воспроизведения контура выработки. - Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: Збірник наукових праць. - Донецьк: ВАТ "НДІГМ імені М.М. Федорова", 2008-2009. - Вип. 102-103. - С. 404-414.
  10. Принципы интеллектуализации рабочих процессов мехатронной выемочной машины/ Шабаев О.Е. Семенченко А.К., Хиценко Н.В. // Вісті Донецького гірничого ін-ту. - 2010. - №1. - С. 68-78.
  11. Математическая модель рабочего процесса горной выемочной машины как мехатронного объекта / Шабаев О.Е. Семенченко А.К., Хиценко Н.В., Степаненко Е.Ю. // Вісті Донецького гірничого ін-ту. - 2010. - №2. - С. 252-264.

## **НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ПРОХІДНИЦЬКИХ КОМБАЙНІВ ЯК МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ**

Шабаєв О.Є., докт. техн. наук, проф.

Донецький національний технічний університет

*Розроблено математичну модель синтезу гірничих виїмкових машин як мехатронних об'єктів. Модель дозволяє здійснювати обґрунтування раціональних структури, параметрів та алгоритму функціонування комбайна, а також адаптацію параметрів і алгоритмів системи інтелекту машини до умов експлуатації.*

**МЕХАТРОНІКА, ПРОХІДНИЦЬКИЙ КОМБАЙН, СИНТЕЗ, ЦІЛЬОВА ФУНКЦІЯ, АДАПТАЦІЯ, ТЕМП ПРОХОДКИ, РЕСУРС**

## **SCIENTIFIC BASES OF CREATION ROADHEADER HOW MECHATRONIC SYSTEMS**

O. Shabaev, doctor of technical science, professor

Donetsk National Technical University

*The mathematical model for the synthesis of rock excavation machine as mechatronic object is developed. The model allows estimation of rational structure, parameters and operation algorithm of heading machine, as well as the adaptation of parameters and algorithms of machine intelligence control system to operating conditions.*

MECHATRONICS, ROAD-HEADER, SYNTHESIS, THE OBJECTIVE  
FUNCTION, ADAPTATION, TUNELING SPEED, RESOURCE

Мобильный телефон: **095-429-13-32** (Шабаетв Олег Евгеньевич).