

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ «УПРАВЛЕНИЕ-ПОДАЧА» ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА

Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Степаненко Е.Ю., Хиценко Н.В.

## **Annotation**

Developed the structure of roadheader as mechatronics object with intelligence system «control-feed» actuating mechanism and based the performance criterion of it. Ascertained the influence of prediction the change of mode parameters of operation to main indexes of roadheaders technical level.

## **Аннотация**

Разработана структура проходческого комбайна как мехатронного объекта с интеллектуальной системой «управление-подача» исполнительного органа и обоснован критерий для оценки ее эффективности. Установлено влияние прогноза изменения режимных параметров работы на основные показатели технического уровня проходческого комбайна.

***Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.*** В настоящее время основным способом проведения подготовительных выработок является комбайновый. Уровень механизации основных технологических операций по их проведению (разрушение горного массива и погрузка отделенной массы) на угольных шахтах Украины составляет 80 – 85%. Дальнейшее повышение технического уровня проходческих комбайнов (ПК) обеспечит повышение конкурентоспособности отечественных горных машин и эффективности горного производства. Особенностью эксплуатации ПК является их использование в широком диапазоне изменения прочностных свойств разрушаемого горного массива, которые не всегда могут быть априорно известными. В связи с этим возникает необходимость регулирования производительности комбайна путем изменения режимных параметров в зависимости от условий его работы. Для эффективного регулирования нагрузки на привод исполнительного органа ПК в зависимости от изменяющихся горно-геологических условий забоев комбайн должен проектироваться как мехатронный объект с интеллектуальной системой управления [3]. Поэтому разработка интеллек-

туальной системы «управление-подача» исполнительного органа ПК, способной прогнозировать и изменять режимные параметры машины в зависимости от изменения прочностных свойств разрушаемой породы является актуальной научной задачей.

**Анализ исследований и публикаций.** Вопросу обоснования рационального способа регулирования производительности ПК посвящено множество работ [1, 2, 3]. Основными управляемыми при изменении свойств разрушаемых массивов режимными параметрами для ПК могут быть: скорость подачи  $V_n$  исполнительного органа и скорость резания  $V_p$  для резцов коронки. При этом возможно одновременное изменение этих параметров – двухпараметрическое регулирование с поддержанием рационального соотношения между параметрами среза на резцах.

На сегодняшний день основным способом регулирования производительности ПК является плавное регулирование нагрузки путем изменения скорости подачи его исполнительного органа. Однако, как отмечено в работе [3], указанный способ регулирования не позволяет в полной мере предотвратить резкое увеличение нагрузок, возникающее в силовых подсистемах ПК при его работе на переходном участке забоя с одной прочности разрушаемой породы на другую, более высокую. Это обусловлено тем, что силовые подсистемы комбайна обладают инерционностью, и управляющие воздействия на их элементы поступают с некоторым запаздыванием. Учет запаздывания в отработке управляющих сигналов может быть реализован при оснащении ПК интеллектуальной системой управления, способной прогнозировать и изменять режимные параметры машины в зависимости от изменения свойств разрушаемой породы.

**Постановка задачи.** Оценка эффективности ПК с интеллектуальной системой «управление-подача» исполнительного органа, способной прогнозировать и изменять режимные параметры его работы, предполагает решение следующих задач:

- разработка структурной схемы ПК как мехатронного объекта с интеллектуальной системой «управление-подача» его исполнительного органа;
- разработка требований к интеллектуальной системе «управление-подача» исполнительного органа ПК и обоснование критерия для оценки ее эффективности;

- исследование влияния прогноза изменения скорости подачи исполнительного органа ПК на основные показатели технического уровня комбайна при переходе его на разрушение участков забоя более высокой контактной прочности.

### ***Изложение материала и результаты.***

Рабочий процесс ПК в пределах полного рабочего цикла сопровождается реализацией различных технологических операций, что обуславливает необходимость изменения положения элементов машины в рабочем пространстве забоя, а следовательно, и изменения характера и величины сил взаимодействия ее элементов как между собой, так и с внешней средой. Поэтому закономерности формирования рабочего процесса определяются свойствами не только машины и внешней среды, но и характером управления ее приводом. Таким образом, рабочий процесс должен рассматриваться как функционирование динамической системы «управляемая машина - внешняя среда».

Особенностью рабочего процесса ПК также является изменение его положения (перемещение в пространстве проходческого забоя). Пространственные перемещения машины происходят под действием нагрузок, формируемых как в ее элементах, так и в зонах ее взаимодействия с внешней средой. Изменения направления движения, положения рабочего органа, полная или частичная потеря устойчивости машины обуславливают изменения связей между ее элементами и внешней средой. Эти связи могут изменяться как в пространстве, так и во времени, вызывая изменения структуры системы «управляемая машина - внешняя среда», которые сопровождаются переходными процессами нагружения элементов машины. Кроме этого, управляющие воздействия на элементы конструкции машины отрабатываются не мгновенно, а имеют определенную инерционность. Это приводит к запаздыванию в выполнении технологических операций и изменении режимных параметров, требуемых в текущий момент времени. Следует отметить, что влияние этих процессов на нагруженность элементов машины и ее ресурс существенно. Поэтому одним из способов повышения технического уровня ПК является проектирование интеллектуальной системы управления, позволяющей реализовать прогноз и изменение режимных параметров комбайна в зависимости от изменения свойств разрушаемого массива, а сам комбайн должен быть представлен как мехатронный объект [4].

***Мехатроника*** – это область науки и техники о создании и эксплуатации технических объектов (систем) с компьютерным управле-

нием, которая базируется на механике, электротехнике, силовой электронике, микропроцессорной технике, автоматизированном многокритериальном оптимальном проектировании, информатике, технической диагностике, компьютерном управлении и программном обеспечении и позволяет обеспечить принципиально новые качества, рекордные параметры и повышение безопасности.

Основными принципами мехатроники являются: системное объединение элементов различной физической природы и функционального назначения; сбор и накопление информации о внешней среде и состоянии технического объекта; интеллектуализация управления рабочими процессами.

В соответствии с мехатронным подходом, который требует одновременного проектирования силовых систем и системы управления машиной, ПК должен быть представлен как совокупность взаимосвязанных пространственно перемещающихся масс (ППМ), изменяющих свое положение в пространстве под действием нагрузок, формирующихся в узлах их взаимодействия между собой и с внешней средой в результате компьютерного управления приводами ее силовых систем, что обеспечивает повышение эффективности работы машины путем оптимизации ее рабочего процесса по критериям производительности, энергопотребления и надежности на основе текущей информации о техническом и пространственном состоянии этих систем и данных о параметрах внешней среды.

Основными показателями технического уровня горных машин являются производительность, надежность и металлоемкость. Определяющее влияние на эти показатели оказывает процесс разрушения массива исполнительным органом, причем его система подачи принимает в этом процессе непосредственное участие. Поэтому при разработке структуры ПК как мехатронного объекта первостепенное внимание должно уделяться интеллектуализации системы подачи исполнительного органа и модернизации ее в интеллектуальную систему «управление-подача» исполнительного органа ПК.

Исходя из этого положения, была разработана представленная на рис.1 структурная схема ПК как мехатронного объекта. Согласно схеме, основными элементами машины являются:

*ППМ* – это деталь, узел или конструкция машины, которая рассматривается как абсолютно жесткое тело, перемещающееся в пространстве и обладающее инерционными свойствами. К ППМ относятся корпус ПК, поворотная турель, стрела и редуктор исполнитель-

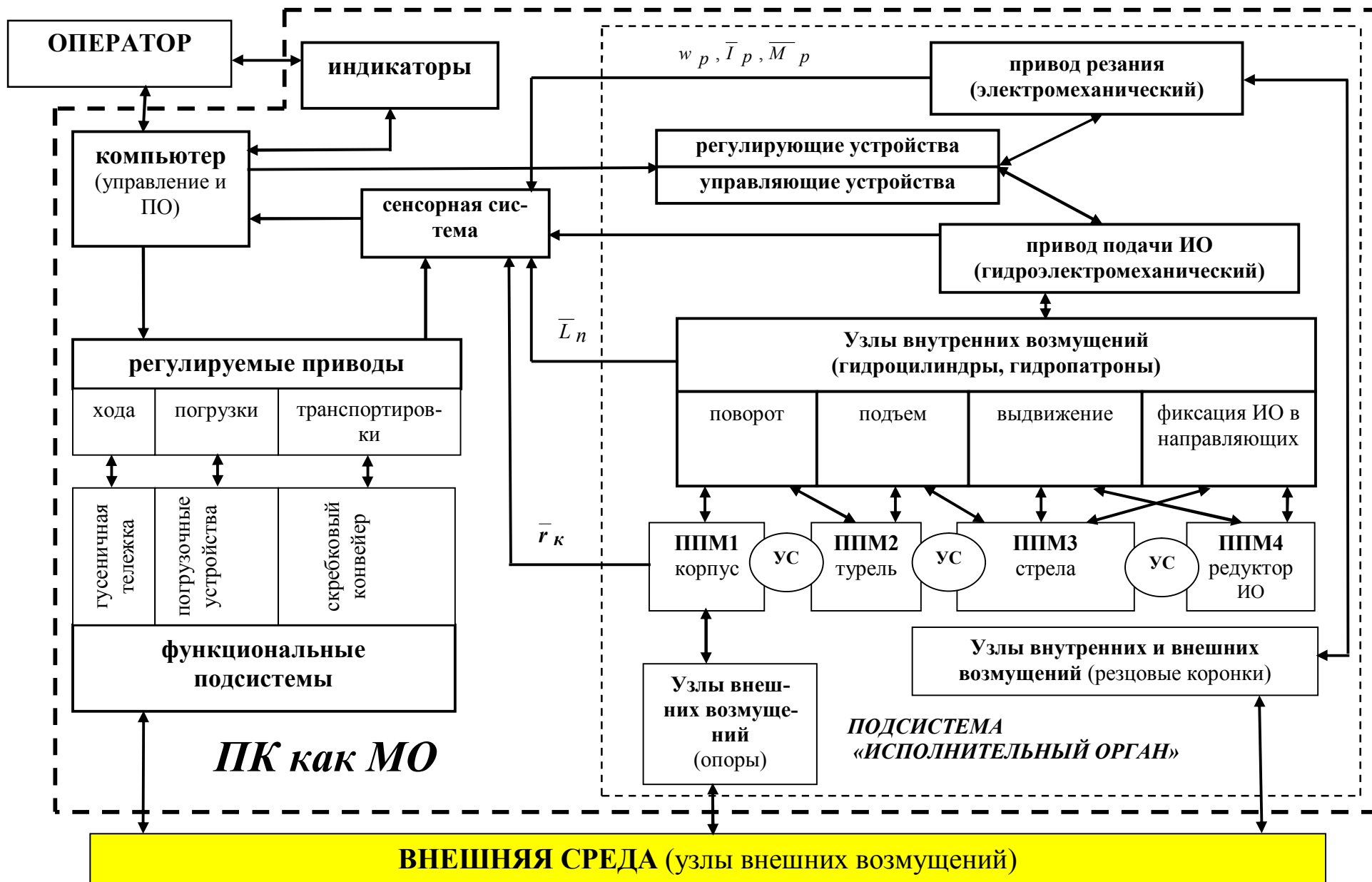


Рисунок 1 – Структурная схема ПК как мехатронного объекта

ного органа.

*Узлы связи (УС)* – это пассивные элементы конструкции машины, обладающие упруго-диссипативными свойствами, обеспечивающие соединение ППМ с целью ограничений их взаимных перемещений, а их параметры не зависят от состояния привода. К узлам связи относятся: шарниры, упоры, упругие валы и т.д..

*Узлы внутренних возмущений* – это активные элементы конструкции машины, способные генерировать силовые возмущения и обладающие упруго-диссипативными свойствами, они связаны с ППМ и элементами привода машины, и их параметры зависят от его состояния. К таким элементам относятся гидроцилиндры и маховики.

*Узлы внешних возмущений* – это зоны взаимодействия элементов конструкции машины с внешней средой. К узлам внешних возмущений относятся: зона контакта элементов рабочего органа ПК с разрушаемым горным массивом, зона контакта опорных элементов комбайна с внешней средой (почвой выработки).

*Узлы внутренних и внешних возмущений* – это активные элементы конструкции машины, способные генерировать силовые возмущения и обладающие упруго-диссипативными свойствами. Они связаны с ППМ, элементами привода машины и внешней средой. Их параметры зависят от его состояния привода и параметров внешней среды. К этим узлам можно отнести резцовые коронки ПК.

*Силовые приводы* – модуль привода, включающий механическую, гидравлическую и электрическую части или другие сочетания этих и других частей привода. Например, привод подачи исполнительного органа (электродвигатель + гидронасос).

*Регулирующее устройство* – модуль привода регулирования, представляющий механическую, гидравлическую и электрическую части или другие сочетания этих и других частей привода, обеспечивающий изменение регулируемого параметра силового привода. Например, привод изменения эксцентриситета гидронасоса или частотный преобразователь.

*Управляющее устройство* – модуль привода регулирования, представляющий механическую, гидравлическую и электрическую части или другие сочетания этих и других частей привода, обеспечивающий изменение положений ППМ в пространстве забоя и друг относительно друга.

*Сенсорная система*, предназначена для преобразования и ввода в бортовой компьютер информации, получаемой от первичных пре-

образователей (датчиков), о параметрах, характеризующих состояние элементов мехатронного объекта и свойства внешней среды.

Согласно схемы, представленной на рис.1, информация об изменении прочности разрушаемого массива может быть получена косвенно путем соответствующей обработки показаний датчиков тока и момента приводного двигателя резания. Датчики линейных перемещений поршней гидроцилиндров поворота, подъема и выдвижения исполнительного органа позволяют получить информацию о скорости его подачи в различных режимах работы ПК (боковой рез, вертикальная зарубка, фронтальная зарубка). Данные о скорости резания при регулируемом приводе резания могут быть получены путем использования датчика скорости, установленного на двигателе резания. Информация о положении корпуса ПК в пространстве подготовительного забоя может быть представлена с использованием датчика типа GPS-навигатора (определение местоположения путём измерения расстояний до объекта от точек с известными координатами).

*Система интеллекта мехатронного объекта* – бортовой компьютер с необходимым программным обеспечением для решения задачи многокритериальной оптимизации рабочего цикла горной машины по критериям производительности, энергопотребления и надежности ее работы с учетом ограничивающих факторов.

Данное представление ПК обеспечивает описание рабочего процесса функционирования ПК как мехатронного объекта с учетом его основных особенностей:

- изменение в пространстве и времени структуры системы «управляемая машина - внешняя среда»;
- многомассовость и пространственность ПК как объекта исследования и проектирования, а также пространственность перемещения и нагружения его элементов;
- компьютерное управление, обеспечивающее повышение технического уровня ПК на основе автоматизации интеллектуальной деятельности по его управлению.

Таким образом, интеллектуальная система «управление-подача» исполнительного органа ПК, согласно особенностям его рабочего процесса, указанным выше, должна удовлетворять следующим требованиям:

- эффективная регулировка нагрузки приводов и защита двигателей от перегрузок;

- управление режимными параметрами рабочего процесса ПК (скорость подачи ИО, скорость резания);
- ограничение динамической нагруженности силовых подсистем;
- выдача информации о режимных параметрах приводов резания и подачи ИО;
- контроль состояния оборудования и окружающей среды путем сбора, обработки и предоставления на индикаторы, контрольные приборы и буквенно-цифровые дисплеи информации о различных параметрах, положении подвижных частей, характере и месте отказов, а также выдача прогноза на ближайшую перспективу, что позволит сократить простои машины за счет планово-предупредительных ремонтов.

Наиболее значимыми показателями технического уровня горных машин являются производительность и ресурс. Основная цель регулирования нагрузки может быть определена как обеспечение работы машины в оптимальных режимах функционирования ее исполнительного органа, а также обеспечение минимальной динамической нагруженности как силовых подсистем, так и металлоконструкций. Действительно работа в оптимальных режимах обеспечивает повышение производительности и снижение энергопотребления, а минимальная динамическая нагруженность позволяет обеспечить требуемый ресурс работы машины с минимальной металлоемкостью.

Одним из направлений решения вопроса об эффективной регулировке нагрузки приводов исполнительного органа ПК и управлении режимными параметрами рабочего процесса машины является проектирование интеллектуальной системы «управление-подача» исполнительного органа, обеспечивающей прогноз снижения скорости его подачи с некоторым опережением до начала обработки участков забоя более высокой контактной прочности. Вместе с тем, при реализации такого режима работы увеличивается время цикла обработки забоя, что теоретически обуславливает снижение производительности ПК. Поэтому необходимо обосновать критерий, позволяющий оценить эффективность интеллектуальной системой «управление-подача» исполнительного органа ПК.

Для оценки ресурса машины могут быть использованы накопленные повреждаемости в элементах конструкции за полный цикл работы ПК [3], которые определяются путем формирования массива



реализаций нагрузок в силовых подсистемах машины за цикл обработки забоя с последующей обработкой методом «дождя» и рассчитываются как:

$$НП(F) = \sum_{i=1}^n A_{Fi}^m, \quad (1)$$

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

Анализ зависимости (1) показывает, что наиболее действенным путем повышения ресурса ПК, является снижение величины амплитуды нагрузки.

Изменение темпов проходки (производительности) ПК с интеллектуальной системой «управление-подача» исполнительного органа, обладающей функцией прогноза, может быть рассчитано как:

$$\Delta L = \left( \frac{L_2}{L_1} - 1 \right) \cdot 100\% = \left( \frac{k_{M2}}{k_{M1}} \cdot \frac{T_{\text{ц}}}{T_{\text{ц}} + k_{M2} \cdot t_{\text{он}} \cdot \left( \frac{V_{n1}}{V_{n2}} - 1 \right) \cdot N} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $L_1, L_2$  – темпы проходки при работе ПК, оснащенного гидравлическим регулятором нагрузки [3] и интеллектуальной системой «управление-подача» исполнительного органа соответственно, м/см;  $T_{\text{ц}}$  – чистое время работы комбайна по выемке за цикл, с;  $t_{\text{он}}$  – время опережения, с;  $V_{n1}, V_{n2}$  – скорость подачи до и после срабатывания регулятора нагрузки [3] при увеличении прочности разрушаемой породы, м/мин;  $N$  – число переходных участков за цикл обработки забоя;  $k_{M1}$  – коэффициент машинного времени,  $k_{M1} = 0,1 \dots 0,3$ ;  $k_{M2}$  – коэффициент машинного времени с учетом времени опережения, определяемый по зависимости:

$$k_{M2} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{k_2} - 1 \right) \cdot \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{k_{M1}} - \frac{1}{k_2}}, \quad (3)$$

где  $k_2$  – коэффициент готовности машины,  $k_2 = 0,85 \dots 0,9$ ;  $\frac{R_1}{R_2}$  – отношение ресурса машины с интеллектуальной системой к ресурсу без нее, оцененное по накопленной повреждаемости.

Для оценки эффективности интеллектуальной системы «управление-подача» исполнительного органа ПК, способной прогнозировать необходимое изменение режимных параметров работы ПК в зависимости от изменения прочностных свойств разрушаемого массива, был проведен модельный эксперимент, предусматривающий алгоритм управления, приведенный на рис.2. В качестве объекта исследования принят проходческий комбайн КПД.

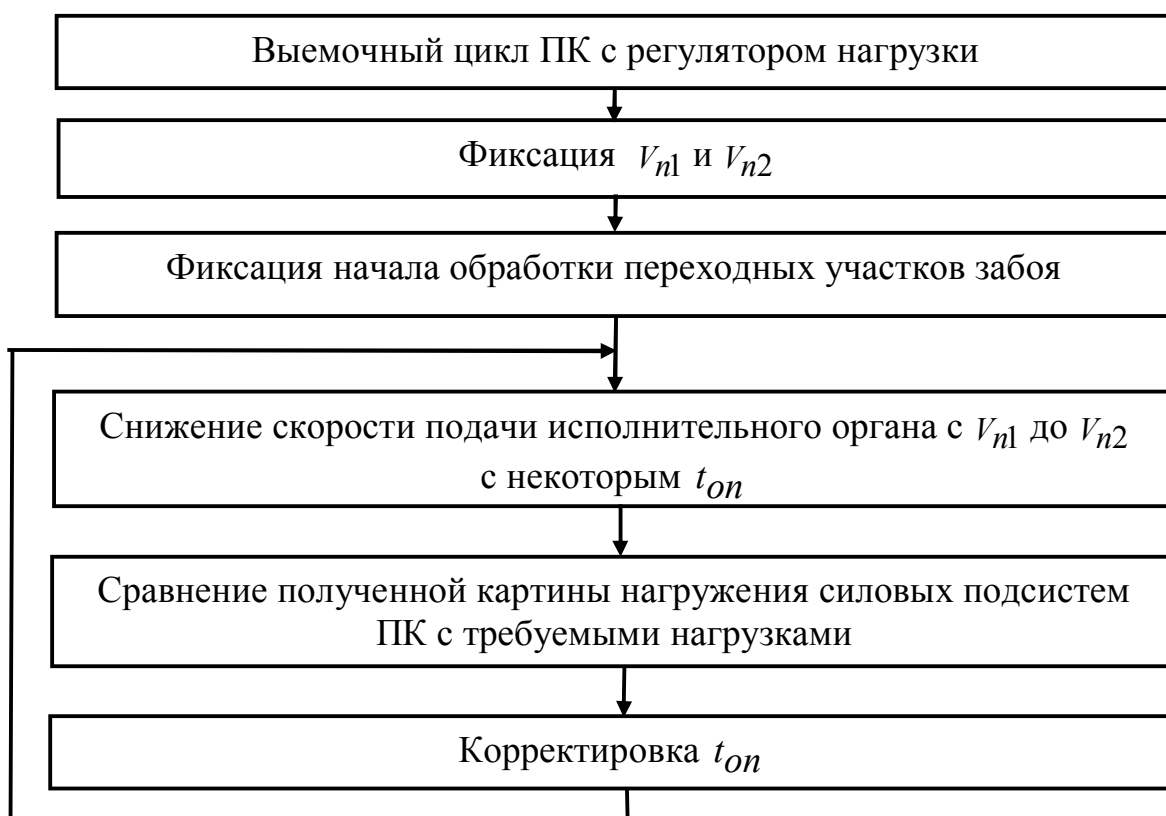


Рисунок 2 – Алгоритм интеллектуального управления системы подачи исполнительного органа ПК

Полный рабочий цикл обработки забоя включает в себя различные режимы разрушения в определенной последовательности. Поэтому для последующего анализа эффективности интеллектуальной системы «управление-подача» исполнительного органа ПК был составлен характерный полный рабочий цикл обработки забоя арочного сечения (ширина – 4,6 м, высота – 3,2 м), приведенный на рис.3.

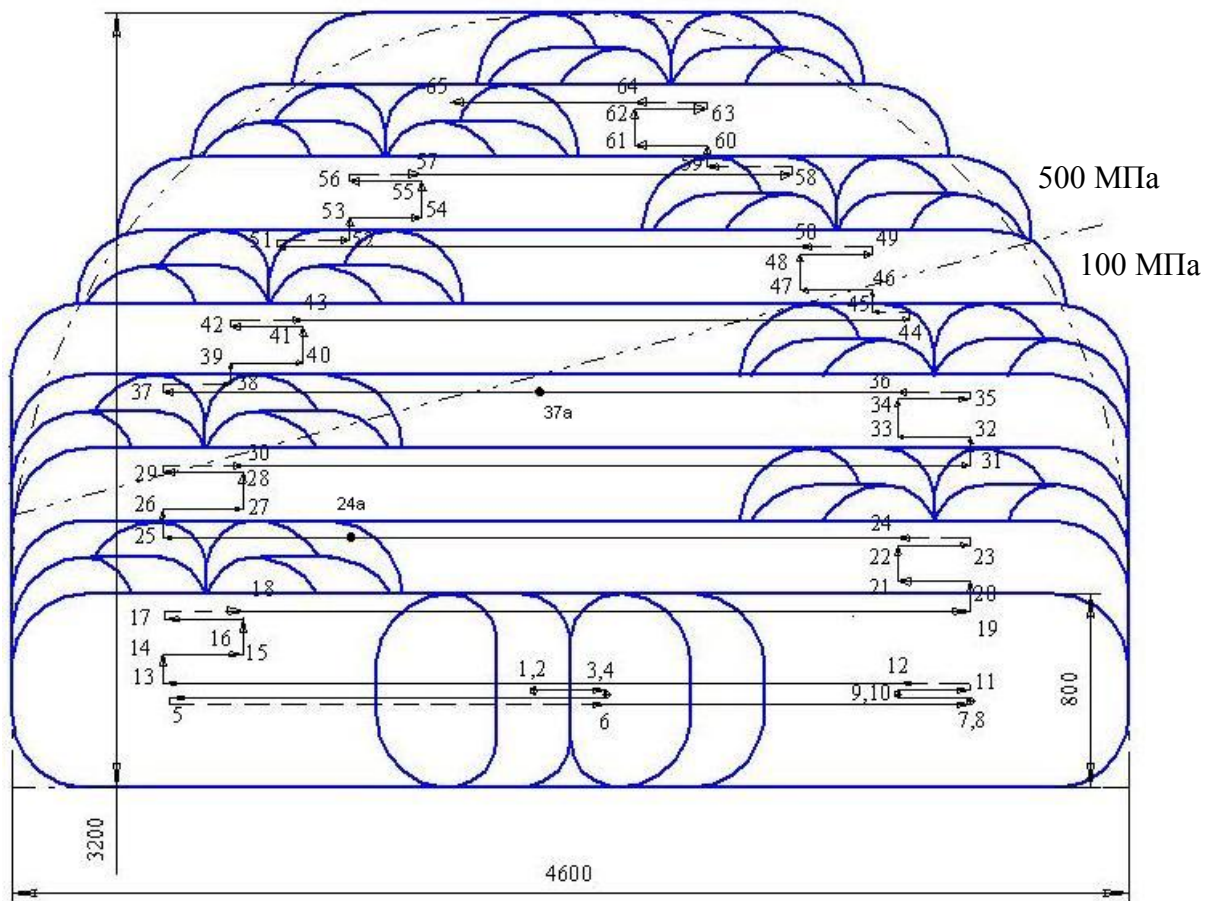


Рисунок 3 – Полный рабочий цикл обработки забоя

С целью воссоздания полного рабочего цикла был разработан план вычислительного эксперимента (табл. 1), который предусматривает реализацию основных режимов разрушения забоя ИО: фронтальной зарубки, боковых резов вправо и влево, вертикальной зарубки вверх с наиболее характерными параметрами среза для забоя сложной структуры, включающего породные прослойки различной прочности – 100 и 500 МПа.

Согласно плана вычислительного эксперимента были проведены модельные исследования влияния интеллектуальной системы «управление-подача» исполнительного органа ПК на нагруженность его силовых подсистем. В качестве примера на рис.4а приведен фрагмент реализаций модельного эксперимента изменения нагрузки в шарнире подвески поворотной рамы исполнительного органа за полный цикл обработки забоя. На рисунке выделена зона I, формируемая в процессе разрушения при переходе с контактной прочности 100 МПа на 500 МПа. Эта зона обуславливает формирование максимальных амплитуд за цикл обработки забоя, которые в значительной степени определяют ресурс ПК.

Таблица 1 – План вычислительного эксперимента

№ опыта	Режим разрушения				Номер серии опытов**					
	Вид режима*	В, м	$\Delta H$ , м	$p_k$ , МПа	I	II	III	IV	V	VI
1	ФЗ	-	0,8	100	x	x	x	x	x	x
2	БРП	0,3	0,8	100	x	x	x	x	x	x
3	БРЛ	0,3	0,8	100	x	x	x	x	x	x
4	ВЗ	0,6	0,3	100	x	x	x	x	x	x
5	БРП	0,6	0,3	100	x	x	x	x	x	x
6	БРЛ	0,6	0,3	100	x	x	x	x	x	x
7	БРЛ	0,6	0,3	100-500	x	x	x	x	x	x
8	ВЗ	0,6	0,3	500	x	x	x	x	x	x
9	БРП	0,6	0,3	500	x	x	x	x	x	x
10	БРЛ	0,6	0,3	500	x	x	x	x	x	x

\* Аббревиатуры режимов: ФЗ, ВЗ – фронтальная и вертикальная (вверх) зарубка; БРП, БРЛ – боковой рез вправо и влево (ориентация разрушаемого массива – пачка находится сверху).

\*\* Различным сериям опытов соответствуют следующие значения времени опережения в начале снижения скорости подачи исполнительного органа ПК до начала обработки переходного участка забоя: I -  $t_{on} = 0,0$  с (с регулятором нагрузки, не предусматривающим прогноз); II -  $t_{on} = 0,3$  с; III -  $t_{on} = 1,0$  с; IV -  $t_{on} = 1,5$  с; V -  $t_{on} = 2,0$  с; VI -  $t_{on} = 3,0$  с.

Результаты обработки данных вычислительного эксперимента позволили установить, что при наиболее рациональном времени опережения 1,5 с наличие интеллектуальной системы «управление-подача» исполнительного органа в составе ПК приводит к снижению накопленных повреждаемостей:

- в шарнирах поворота до 30,0 раз; в шарнирах подъема до 7,0 раз;
- в гидроцилиндрах поворота до 1,16 раз; в гидроцилиндрах подъема и выдвижения до 14,0 раз;
- в трансмиссии до 30,0 раз;

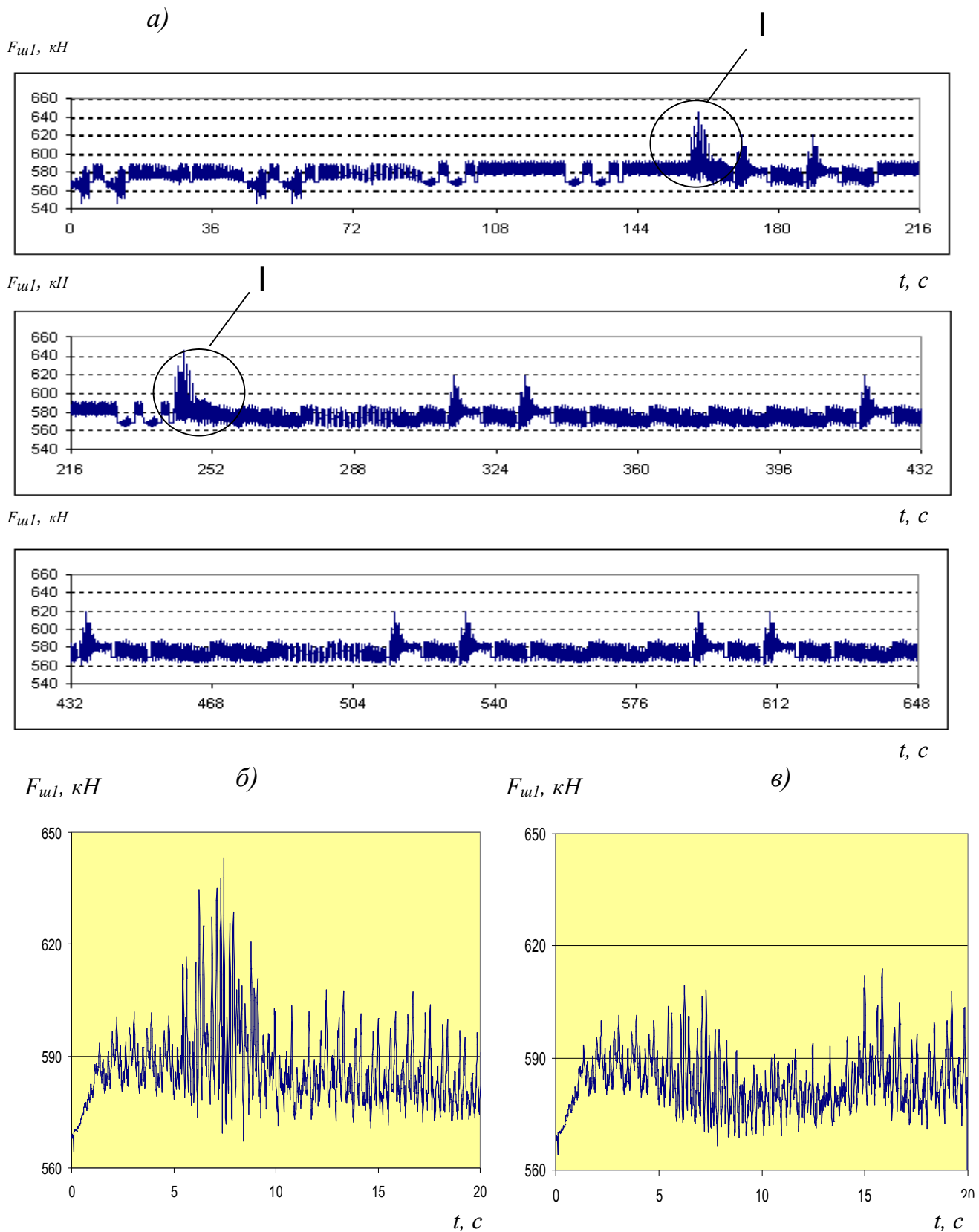


Рисунок 4 – Изменение нагрузки в шарнире подвески поворотной рамы исполнительного органа за полный цикл обработки забоя (*a*) в переходной зоне I (со 100 на 500 МПа), с регулятором нагрузки (*б*) и с прогнозирующей системой «управление-подача» (*в*)

- от действия составляющих вектора внешней нагрузки на коронках:  $F_x$  – в 4,0 раза,  $F_y$  – в 1,11 раз,  $F_z$  – в 50 раз.

При этом эксплуатационная производительность, полученная с учетом зависимостей (2), (3), вследствие повышения ресурса машины, а следовательно, и снижения потерь рабочего времени на устранение отказов также увеличивается до 3,5%.

Таким образом, применение интеллектуальной системы «управление-подача» исполнительного органа ПК позволяет существенно увеличить его ресурс без потерь эксплуатационной производительности.

### ***Выводы и направление дальнейших исследований.***

1. Разработана структурная схема проходческого комбайна как мехатронного объекта с интеллектуальной системой «управление-подача» исполнительного органа, способной прогнозировать изменение режимных параметров работы комбайна в зависимости от изменения прочностных свойств разрушаемого массива. Прогноз осуществляется путем учета необходимого временного опережения в снижении скорости подачи исполнительного органа до обработки переходного участка забоя более высокой прочности.

2. На основе проведенных исследований обоснован критерий оценки эффективности интеллектуальной системы «управление-подача» исполнительного органа при проектировании проходческого комбайна нового технического уровня.

3. На примере проходческого комбайна КПД установлено, что применение интеллектуальной системы «управление-подача» приводит к существенному повышению ресурса его элементов конструкции (накопленная повреждаемость в корпусных конструкциях снижается в 7-30 раз) без снижения эксплуатационной производительности комбайна.

4. Одним из направлений дальнейших исследований является разработка и оценка эффективности интеллектуальных систем приводов резания и подачи исполнительного органа проходческого комбайна, реализующих двухпараметрическое регулирование с поддержанием рационального соотношения между параметрами среза на резцах.

#### **Список литературы:**

1. Семенченко А.К., Хиценко Н.В. Актуальность применения регулируемой системы подачи исполнительного органа проходческого комбайна // Сборник научных трудов, посвященный 45-летию ДГМИ, "Перспективы развития угольной промышленности в XXI веке". - Алчевск: ДГМИ, 2002. - С. 180-185.

2. Семенченко А.К., Хиценко Н.В. Обоснование рационального способа регулирования нагрузки на привод исполнительного органа проходческого комбайна // Проблемы експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: Збірник наукових праць. - Донецьк: ВАТ "НДІГМ імені М.М. Федорова", 2003. - Вип. 96. - С. 165-172.
3. Шабаев О.Е., Семенченко А.К., Хиценко Н.В., Семенченко Д.А., Степаненко Е.Ю. Повышение ресурса проходческих комбайнов с аксиальными коронками на основе регулятора нагрузки в системе подачи исполнительного органа // Наукові праці Донецького національного технічного університету, Вип. 16 (142), Серія: Гірничо-електромеханічна, Донецьк, 2008. – С. 265-274.
4. Семенченко А.К., Шабаев О.Е., Семенченко Д.А., Хиценко Н.В. Принципы создания проходческих комбайнов как мехатронных систем // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. Випуск 113. - Донецьк, 2006. - С. 238-243.