УДК 622.232:681.5:004.94

Страдухин Евгений Иванович, аспирант; Хорешок Алексей Алексеевич, профессор, д.т.н., научный руководитель
(КузГТУ, г. Кемерово)
Evgeny I. Stradukhin, postgraduate student; Alexey A. Khoreshok, professor, doctor of engineering sciences, scientific supervisor
(KuzSTU, Kemerovo)

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМ ОРГАНОМ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УСЛОВИЙ РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА

SUBSTANTIATION OF THE ADAPTIVE CONTROL SYSTEM STRUCTURE FOR A ROADHEADER CUTTING UNIT UNDER VARIABLE ROCK CUTTING CONDITIONS

Аннотация. Обоснована структура управления рабочим органом проходческого комбайна по нагрузке привода. Данные датчиков обрабатываются на борту машины. По расчетной оценке нагрузки регулятор изменяет подачу, глубину резания и частоту вращения коронки.

Abstract. A load-based control structure for a roadheader cutting unit is proposed. Sensor signals are processed on board. The controller adjusts feed speed, cutting depth and cutting-head speed according to the calculated load.

Нагрузка привода и темп проведения подготовительной выработки зависят от режима работы рабочего органа. Рассматривается комбайн избирательного действия среднего класса с телескопической стрелой и продольно-осевой режущей коронкой [4]. При обработке забоя коронка проходит участки массива с различными свойствами. Поэтому параметры резания необходимо изменять с учетом нагрузки, возникающей при контакте резцов с породой [1].

При ручном управлении подачу и глубину резания задает машинист. Он корректирует их по мере изменения нагрузки. Своевременность регулирования зависит от его опыта и скорости реакции. Автоматическая система должна не только вести коронку по заданной траектории, но и ограничивать нагрузку при изменении условий резания.

Для выбора режима необходимы сведения о состоянии рабочего органа и приводов. Их получают по измерениям и используют для расчета ожидаемой нагрузки. По результатам расчета задают параметры резания. Отдельно определяют траекторию коронки и согласуют работу комбайна с оборудованием забоя. В настоящей работе рассматривается связь между оценкой нагрузочного состояния и изменением параметров режима.

Цель работы состоит в обосновании структуры адаптивного управления рабочим органом проходческого комбайна. Режим резания выбирают по нагрузке привода и динамическому состоянию машины. При этом сохраняются штатные ограничения и защиты.

Объект управления включает режущую коронку с резцами, телескопическую стрелу, привод резания и механизмы подъема и поворота стрелы.

Нагрузки при резании зависят от физико-механических свойств массива и состояния резцов. Породные прослои и крепкие включения, трещиноватость и абразивность пород изменяют условия работы инструмента. Износ резцов дополнительно влияет на сопротивление разрушению. Непрерывно определять прочностные свойства каждой части забоя затруднительно. Поэтому их влияние оценивают по нагрузке и вибрации машины.

Регистрируют силу тока двигателя резания I и активную мощность P. Давление p измеряют в гидросистеме перемещения стрелы; вибрацию оценивают по среднеквадратическому ускорению a. Дополнительно контролируют частоту вращения n и положение рабочего органа. Регулируемыми параметрами приняты скорость подачи рабочего органа $v_{\text{п}}$, глубина резания h и частота вращения коронки n.

Рост тока сам по себе не доказывает увеличения прочности породы. Его могут вызвать также увеличение глубины резания, снижение частоты вращения, затупление резцов или затруднение движения. Сходные изменения давления тоже имеют разные причины. По совокупности измерений оценивают нагрузочное состояние. Определение прочности массива требует дополнительной идентификации.

Изменение сопротивления разрушению отражается на токе двигателя, давлении в гидросистеме и вибрации рабочего органа. По этим данным оценивают состояние машины и ожидаемую нагрузку. Регулятор изменяет $v_{\text{п}}$, h и n, а последующие измерения показывают результат регулирования.

Результаты измерений тока, давления и вибрации выражают в относительных единицах. Для этого используют опорные значения, установленные по технической документации и испытаниям конкретной машины:

$$K_I = \frac{I}{I_{\text{доп}}}; K_p = \frac{p}{p_{\text{доп}}}; K_v = \frac{a_{rms}}{a_{\text{доп}}} \quad (1)$$

где $I_{\text{доп}}$, $p_{\text{доп}}$ и $a_{\text{доп}}$ - установленные уровни нагрузки. Единица соответствует принятому уровню ограничения. При приближении показателя к этому значению запас по нагрузке уменьшается.

Для упреждающего регулирования необходимо оценить изменение тока при изменении подачи, глубины резания и частоты вращения. Вблизи рассматриваемого режима эту связь можно представить линейной зависимостью приращений:

$$\Delta I = c_v\, \Delta v_{\text{п}} + c_h\, \Delta h + c_n\, \Delta n + d_I \quad (2)$$

где c_v, c_h и c_n - коэффициенты чувствительности тока к скорости подачи, глубине резания и частоте вращения; d_I - неучтенная составляющая изменения тока. Ее определяют по разности измеренного и расчетного

значений. Устойчивое расхождение связывают с изменением условий разрушения или состояния резцов. Единичное отклонение рассматривают как кратковременное воздействие.

Такая запись разделяет влияние заданного режима и изменений условий работы. Коэффициенты зависимости должны определяться для конкретной машины.

Система объединяет измерительную подсистему, блоки обработки сигналов и оценки состояния, расчетную модель, регулятор и штатный контроллер приводов.

Структура системы приведена на рис. 1. По обработанным измерениям оценивают текущее состояние, затем рассчитывают ожидаемую нагрузку при изменении режима. Допустимые значения $v_п$, h и n передают штатному контроллеру приводов. После выполнения команды повторно измеряют ток, давление, вибрацию и частоту вращения.

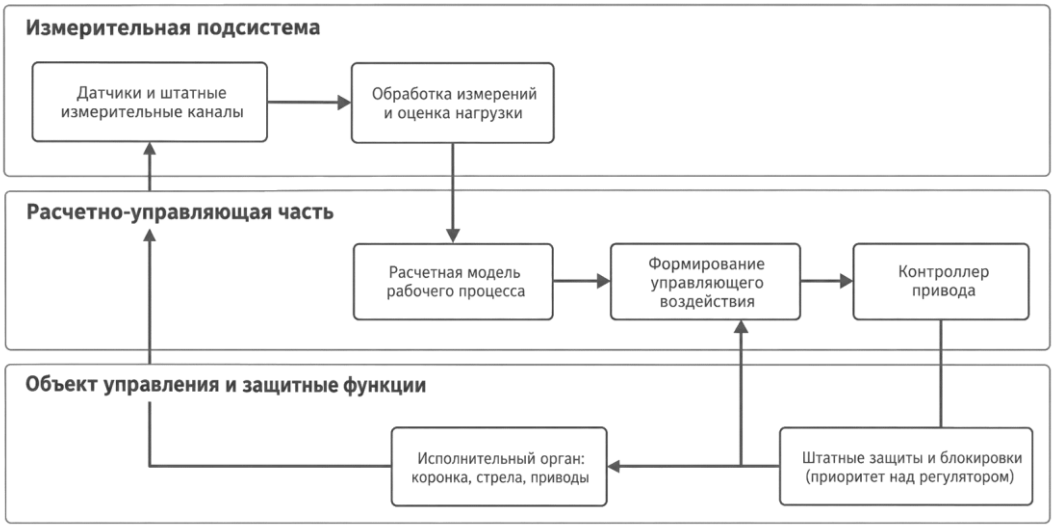

Рис. 1. Структура системы адаптивного управления рабочим органом проходческого комбайна

Расчетная модель связывает параметры режима с нагрузкой. По мере накопления данных ее коэффициенты уточняют. В составе цифрового двойника эта модель может использоваться совместно с геометрическим, кинематическим и эксплуатационным описанием машины [3]. Функции штатного контроллера и защит при этом сохраняются.

Обработку сигналов предусматривается выполнять на борту комбайна, до передачи данных в расчетную модель. Здесь согласуют измерения по времени, фильтруют сигналы и проверяют их достоверность. По току, давлению, вибрации, частоте вращения и положению рабочего органа выделяют признаки состояния. Для их распознавания могут применяться алгоритмы периферийного искусственного интеллекта (ИИ) [5]. Они оценивают состояние и направление его изменения. Команды приводам формирует регулятор по заданным правилам. Штатные

контроллеры и независимые защиты ограничивают исполнение этих команд.

Задача регулятора состоит в поддержании наибольшей допустимой скорости подачи при ограничениях по току, давлению и вибрации. При устойчивом росте нагрузки уменьшают $v_п$, затем, если этого недостаточно, h. Частоту n изменяют в пределах, допускаемых приводом и условиями резания [2].

Для заданных сочетаний $v_п$, h и n рассчитывают ожидаемые значения нагрузки. Искомый режим соответствует наибольшей расчетной производительности при следующих ограничениях:

$$Q(u) \rightarrow max; \quad I_{пр}(u) \leq I_{доп}; \quad p_{пр}(u) \leq p_{доп}; \quad a_{пр}(u) \leq a_{доп} \qquad (3)$$

где $u = \{ v_п, h, n \}$; $Q(u)$ - расчетный показатель производительности; $I_{пр}$, $p_{пр}$ и $a_{пр}$ - прогнозируемые значения тока, давления и вибрации.

При кратковременном росте вибрации подачу быстро уменьшают. Такой эпизод не принимают за устойчивое изменение свойств всего участка массива. Одновременный рост I, p и a при снижении n служит признаком приближения к заклиниванию. В этом случае уменьшают подачу и глубину резания, коронку выводят из контакта с массивом. При сохраняющейся перегрузке действует штатная защита.

После снижения нагрузки заданный режим восстанавливают постепенно. Для ограничения частоты переключений задают разные пороги входа в ограничение и выхода из него.

Таблица 1. Логика изменения режима работы рабочего органа

Состояние процесса	Характерные признаки	Действие системы
Штатное разрушение	I, p и a ниже предупредительных уровней	поддержание заданных $v_п$, h и n
Рост средней нагрузки	устойчивый рост I и p	плавное уменьшение $v_п$, при необходимости h
Ударный режим	кратковременный рост a при сохранении вращения	быстрое уменьшение $v_п$ с последующим восстановлением
Предзаклинивающее состояние	одновременный рост I, p, a и снижение n	минимальная скорость качания, уменьшение h, отход коронки
Аварийное состояние	превышение штатного предела, отказ датчика или блокировка	остановка по штатной системе защит

Для вычислительной проверки принята редуцированная динамическая модель с четырьмя расчетными каналами. Она описывает изменение индексов силы тока K_I, давления K_p, вибрации K_v и температуры K_T. Исходными величинами служат относительное сопротивление массива ρ, показатель износа W_c и нормированные параметры u_v, u_z, u_ω. Последние соответствуют скорости подачи, глубине резания и частоте вращения:

$$\tau_I \frac{dK_I}{dt} = -K_I + a_{I0} + a_{I1} L + a_{I2} W_c + a_{I3} \delta \qquad (4)$$

$$\tau_p \frac{dK_p}{dt} = -K_p + a_{p0} + a_{p1} \rho u_v u_z + a_{p2} \delta \qquad (5)$$

$$\tau_v \frac{dK_v}{dt} = -K_v + a_{v0} + a_{v1} G + a_{v2} W_c + a_{v3} \frac{\Delta\rho}{\Delta t} + a_{v4} \delta \quad (6)$$

$$\tau_T \frac{dK_T}{dt} = -K_T + c_0 + c_I K_I + c_W W_c \quad (7)$$

$$L = \frac{\rho u_v u_z}{u_\omega^{1,18}}; \qquad G = \rho u_v^{1,2} u_z \quad (8)$$

В формулах (4)-(8) L характеризует нагрузочную составляющую, G - динамическую, δ - кратковременный ударный импульс. Величина $\Delta\rho/\Delta t$ представляет скорость изменения относительного сопротивления массива. Коэффициенты и постоянные времени заданы для вычислительного эксперимента. В принятой модели рост сопротивления массива и подачи увеличивает нагрузку. Износ резцов повышает ток и вибрацию, а резкое изменение сопротивления вызывает динамический пик [1, 2]. Постоянные времени τ_I, τ_p, τ_v и τ_T приняты равными 0,42; 0,62; 0,22 и 18 с соответственно. Шаг интегрирования составляет 0,02 с. Эти значения относятся к расчетной модели. Для конкретного комбайна их требуется уточнить по измерениям.

Продолжительность расчетного сценария составляет 120 с. Относительное сопротивление массива ρ и показатель износа W_c задаются по интервалам, приведенным в табл. 2. Последовательность участков принята для проверки реакции регулятора на рост и снижение нагрузки, кратковременные удары и накопление износа.

Таблица 2. Параметры расчетного сценария

Интервал, с	ρ	W_c	Характер расчетного участка
0-20	0,72	0,08	пониженное сопротивление
20-42	1,00	0,10	базовый уровень
42-65	1,34	0,16	повышенное сопротивление
65-82	0,94	0,20	переход; ударные импульсы
82-100	1,18	0,20-0,44	рост сопротивления и износа
100-110	1,52	0,45	максимум сопротивления; импульс около 103 с
110-120	0,80	0,46	снижение сопротивления; износ сохранен

Приближение к предзаклинивающему состоянию оценивают расчетным индексом:

$$R_j = \frac{1}{1 + exp(-\psi)} \quad (9)$$

где ψ - взвешенная сумма положительных превышений предупредительных уровней K_I, K_p, K_v и положительных скоростей роста K_I и K_p. Показатель R_j характеризует приближение к предзаклинивающему состоянию, но не является вероятностью отказа. Для сопоставления ограничения нагрузки и расчетного темпа разрушения используется относительный индекс:

$$П = \frac{u_v u_z u_\omega^{0,30}}{1 + 0,12\ max(\rho - 1; 0)} \quad (10)$$

Значение $П$ служит для сравнения расчетных режимов. Оно не выражает фактическую производительность комбайна в м³/мин.

Сравнены два варианта управления при одном и том же 120-секундном сценарии. В первом параметры режима оставались неизменными, во втором $v_п$, h и n корректировались по нагрузке. Результаты приведены в табл. 3. Это данные численного моделирования, а не стендовых или шахтных измерений. Они относятся к принятой последовательности изменения сопротивления массива и износа резцов.

Таблица 3. Результаты вычислительного сравнения фиксированного и адаптивного режимов

Показатель	Фиксированный режим	Адаптивный режим	Изменение
Пиковый индекс силы тока	1,386	1,051	−24,2 %
Пиковый индекс давления	1,094	0,858	−21,5 %
Среднеквадратический вибрационный индекс	0,552	0,510	−7,6 %
Пиковый расчетный индекс риска заклинивания	0,914	0,353	−61,4 %
Время превышения уровня $K_I = 1{,}15$	10,18 с	0 с	исключено в расчетном сценарии
Средний расчетный индекс производительности	0,984	0,905	−8,0 %

Из табл. 3 видно, что при неизменных параметрах режима рост сопротивления массива приводит к превышению контрольного уровня тока. При адаптивном управлении подача и глубина резания уменьшаются до достижения пика нагрузки. В принятом сценарии это снижает расчетные индексы тока, давления и риска заклинивания. Контрольный уровень тока в адаптивном варианте не превышен.

Средний расчетный индекс производительности при этом снижается примерно на 8 %. Такое изменение обусловлено ограничением подачи и глубины резания. Переносить этот результат непосредственно на сменную производительность нельзя. В производственных условиях дополнительно учитывают простои, ресурс резцов, объем разрушенной массы и работу смежного оборудования.

Геометрический блок задает допустимую область перемещения коронки и последовательность резов. Нагрузочный регулятор определяет режим выполнения этих резов. Уменьшение подачи не устраняет недопустимый выход коронки за проектный контур. Работу в составе проходческого комплекса дополнительно ограничивают готовность транспорта, последовательность операций и независимые защиты. Верхний уровень управления может запретить операцию, но не вмешивается в работу быстродействующего регулятора нагрузки.

Для применения на конкретном комбайне коэффициенты модели необходимо определить по измерениям. Синхронно регистрируют ток и активную мощность привода, давление в гидросистеме, положение и скорость стрелы. Одновременно измеряют частоту вращения, виброускорение и объем разрушенной массы. Результаты распознавания периферийного модуля сохраняют для сопоставления с фактическим режимом работы.

Список литературы

1. Хорешок А.А., Маметьев Л.Е., Цехин А.М., Борисов А.Ю. Актуальные вопросы использования дискового инструмента на рабочих органах проходческих комбайнов избирательного действия // Техника и технология горного дела. 2021. № 4 (15). С. 40-63. DOI: 10.26730/2618-7434-2021-4-40-63.
2. Liu Q., Lu C., Liu T., Xu Z. Adaptive Cutting Control for Roadheaders Based on Performance Optimization // Machines. 2021. Vol. 9. No. 3. Art. 46. DOI: 10.3390/machines9030046.
3. Zhang J., Wan C., Wang J., Chen C., Wang T., Zhang R., Guo H. Research on the shape-performance-control integrated digital twin system for boom-type roadheaders // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 5780. DOI: 10.1038/s41598-024-56539-8.
4. Козлов И.В. Обзор проходческих комбайнов, применяемых на шахтах Кузбасса // Россия молодая: материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Кемерово: КузГТУ, 2024. 9 с.
5. Rahman M.A., Shahrior M.F., Iqbal K., Abushaiba A.A. Enabling Intelligent Industrial Automation: A Review of Machine Learning Applications with Digital Twin and Edge AI Integration // Automation. 2025. Vol. 6, no. 3. Art. 37. DOI: 10.3390/automation6030037.