

А.В. Бубликов, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ “Национальный горный университет”)

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ЗАШТЫБОВКИ ШНЕКА ДОБЫЧНЫХ КОМБАЙНОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА РЕЗАНИЯ

### Вступление

Из-за энергетической неэффективности способа автоматизации режимов работы добычных комбайнов, применяемого сейчас в регуляторах нагрузки, при добыче угля комбайнами на тонких пластах происходит увеличение удельных энергозатрат [1]. Для снижения удельных энергозатрат на добычу угля за счет устранения давлений угля на лопасти шнека при его погрузке необходимо, чтобы автоматическая система фиксировала момент начала заштыбовки исполнительного органа и исключала работу комбайна с затянувшейся заштыбовкой шнека. На сегодняшний день отсутствуют датчики заштыбовки шнека, поскольку их невозможно установить вблизи зоны рабочего пространства шнека из-за агрессивной внешней среды. Поэтому заштыбовку шнека необходимо определять косвенным способом. Перспективным является способ определения заштыбовки шнека на основе статистического анализа физических величин, которые замеряются в процессе работы добычных комбайнов, – тока статора (активной мощности) электродвигателя привода резания и скорости подачи.

### Последние достижения. Цель статьи.

В работе [1] в качестве критерия заштыбовки шнека предложено использовать скользящее среднее отношение мгновенных значений мощности, потребляемой электродвигателем привода резания, которые замерены со смещением во времени, равным четверти периода оборота шнека:

$$k_{\text{зашт.}i} = \frac{\sum_{x=i-T_{\text{уср}}}^i \begin{cases} \frac{P_{x-0,25 \cdot T_{\text{неп}}}}{P_x}, & \text{если } \left\lfloor \frac{x}{0,25 \cdot T_{\text{неп}}} \right\rfloor = (2 \cdot k + 1); \\ \frac{P_x}{P_{x-0,25 \cdot T_{\text{неп}}}}, & \text{если } \left\lfloor \frac{x}{0,25 \cdot T_{\text{неп}}} \right\rfloor = (2 \cdot k) \end{cases}}{T_{\text{уср}}},$$

где  $T_{\text{уср}}$  – количество мгновенных значений мощности, потребляемой электродвигателем привода резания, которое используется для скользящего усреднения;  $T_{\text{неп}}$  – количество мгновенных значений мощности, замеренных в течение периода оборота шнека;  $k$  – некоторое целое число;  $i$  – номер текущего мгновенного значения числового критерия  $k_{\text{зашт.}i}$ ;  $P_x$  – мгновенное значение мощности электродвигателя привода резания при усреднении, кВт;  $P_{x-0,25 \cdot T_{\text{неп}}}$  – мгновенное значение мощности, смещенное во времени относительно значения мощности  $P_x$  на четверть периода оборота шнека, кВт.

Данная статистическая оценка мощности основывается на различии средних значений мощности, потребляемой электродвигателем привода резания, которые замерены на разных угловых интервалах оборота шнека. Чем большее различие наблюдается между средними значениями мощности, тем большее возникает отклонение числового критерия при начале заштыбовки шнека. От величины отклонения числового критерия зависит эффективность обнаружения автоматической системой момента начала заштыбовки шнека. Для гарантированного фиксирования заштыбовки шнека числовой критерий при отклонении должен выйти за пределы изменения его значений при отсутствии заштыбовки. Следовательно, для надежного фиксирования заштыбовки шнека системой автоматического управления добычным комбайном следует исследовать факторы, которые влияют на величину отклонения числового критерия при начале заштыбовки шнека.

В работе [1] показано, что увеличение мощности электродвигателя привода резания при погрузке угля шнеком (мощности погрузки угля) наблюдается на определенных углах его поворота. При этом задавалось определенное положение шнека в момент начала замера мощности, потребляемой электродвигателем привода резания. Однако при работе добычного комбайна нет информации о положении, которое занимает шнек в текущее время. Следовательно, момент начала замера мощности может прийти на другое положение шнека, отличное от того, какое было рассмотрено в работе [1]. Целью статьи является исследование зависимости между величиной отклонения числового критерия от своего среднего значения при начале заштыбовки и положением шнека в момент начала замера мощности электродвигателя привода резания. Результаты исследования позволяют учесть неопределенность положения шнека в момент начала замера мощности при идентификации процесса заштыбовки исполнительного органа комбайна.

**Изложение основного материала исследований**

Исследования проводились с помощью имитационной модели «забой – шнек – электродвигатель привода резания», в основу которой положены известные методики расчета силовых характеристик добычного комбайна [2], математическое описание преобразования энергии в электроприводе и результаты многочисленных исследований статистической динамики добычного комбайна для имитации нагрузки на исполнительном органе [3,4]. Имитационная модель описана в работе [5].

За начальное положение шнека принят момент, когда конечный участок одной из лопастей у разгрузочного торца повернут относительно перпендикуляра к поверхности почвы на угол  $16^\circ$  в направлении вращения шнека (ось  $z$  на рис.1). При этом конечный участок лопасти выйдет из зоны скопившегося угля при повороте шнека на угловое расстояние  $34^\circ$  (линия  $N$  на рис.1). Принятое начальное положение шнека соответствует моменту вхождения одной из лопастей в контакт с массивом угля.

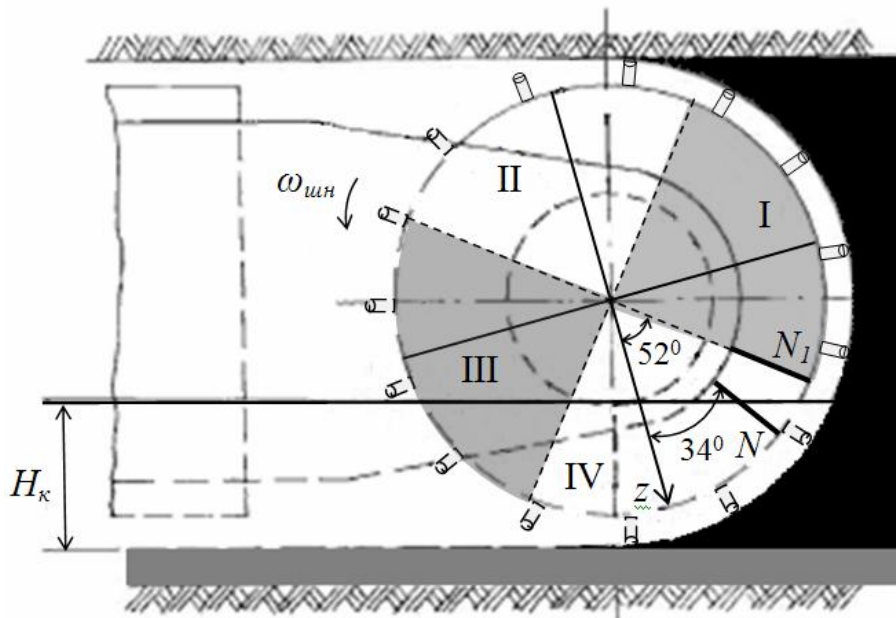


Рис.1. Вид конструктивной схемы шнека со стороны разгрузочного торца

Рассмотрим случай, когда конечный участок лопасти у разгрузочного торца шнека в момент начала замера мощности повернут относительно оси  $z$  (рис.1) на угол  $52^\circ$  в направлении вращения шнека (линия  $N_1$ ). На рис.2,а показан характер появления повышенных значений мощности погрузки угля на четвертях периода оборота шнека. Угловые интервалы поворота шнека, которые соответствуют разным четвертям периода, обозначены на рис.1 римскими цифрами. Причем угловые интервалы, соответствующие первой и третьей четвертям периода, имеют серый цвет. На рис.2,а временные интервалы, которые соответствуют первой и третьей четвертям периода оборота шнека, также имеют серый цвет.

Из рисунка видно, что на начальном этапе заштыбовки (с 29 по 35 с) повышенные значения мощности погрузки в большей мере появляются на первой и третьей четвертях периода оборота шнека по сравнению со случаем, когда момент начала замера мощности совпадает с моментом выхода конечного участка лопасти из зоны скопившегося угля [1]. Это вызвано тем, что с ростом объема циркулирующего угля угловые интервалы оборота шнека, на которых происходит заклинивание угля между поверхностями лопасти и корпуса редуктора, раньше наблюдаются на первой и третьей четвертях периода оборота шнека, распределяясь между разными интервалами замера мощности. Это приводит к тому, что различие между мощностью, замеренной на первой и третьей четвертях периода, и мощностью, замеренной на второй и четвертой четвертях периода, становится не таким заметным.

В связи с изменением положения шнека в момент начала замера мощности двигателя привода резания (линия  $N_1$  на рис.1), из-за уменьшения разности суммарных средних толщин стружки угля, которые имеют место в течение разных интервалов замера мощности, произошло смещение диапазона изменения значений числового критерия (0,92 – 1,04), и его среднее значение составило 0,98. Ширина диапазона изменения значений числового критерия при отсутствии заштыбовки уменьшилась до  $\pm 6,1\%$  от среднего значения. Из рис.2,б видно, что и линия 1, и линия 2 изменяются случайным образом в данном диапазоне значений при отсутствии заштыбовки шнека.

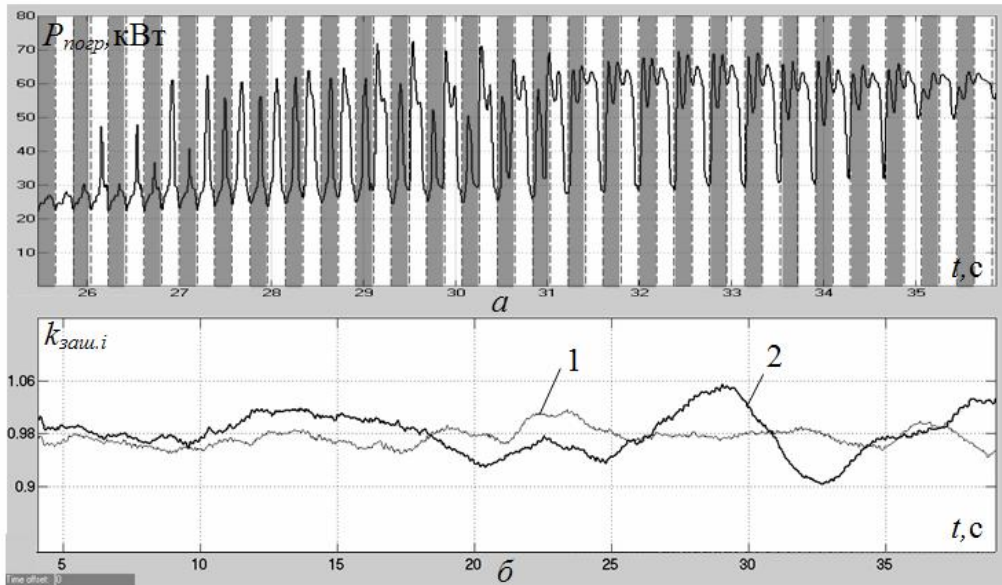


Рис.2. Изменение во времени: *a* – мощности погрузки угля шнеком с двумя лопастями по отношению к четвертям периода оборота шнека; *b* – числового критерия заштыбовки шнека при нормальной погрузке угля (линия 1) и заштыбовке шнека после 20 с (линия 2)

С 27 с происходит увеличение длительности временных интервалов с повышенным значением мощности погрузки (см. рис.2,*a*). При этом наблюдается увеличение числового критерия заштыбовки (линия 2 на рис.2,*b*), однако не так интенсивно, как в случае, рассмотренном в работе [1] (для линии *N* на рис.1). Максимальное относительное отклонение числового критерия от среднего значения составило 8,1%. Следовательно, разность между максимальными относительными отклонениями числового критерия от среднего значения при заштыбовке и без заштыбовки уменьшилась с 6,3 до 2% по сравнению со случаем, рассмотренным в работе [1].

С целью исследования благоприятных и неблагоприятных положений шнека для момента начала замера мощности путем имитационного моделирования получена зависимость между максимальным относительным отклонением числового критерия от среднего значения при заштыбовке шнека и угловым смещением конечного участка лопасти у разгрузочного торца относительно оси *z* неподвижной системы координат (см. рис.1) на момент начала замера мощности.

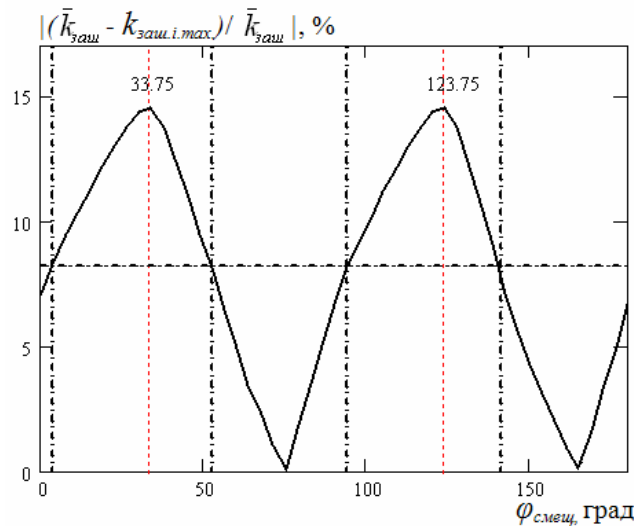


Рис.3. Зависимость между максимальным относительным отклонением числового критерия от среднего значения при заштыбовке шнека и смещением конечного участка лопасти относительно оси *z* неподвижной системы координат на момент начала замера мощности (см. рис.1)

Из рис.3 следует, что зависимость между максимальным относительным отклонением от среднего значения числового критерия при заштыбовке шнека и смещением конечного участка лопасти относительно оси  $z$  на момент начала замера мощности является периодической. Неблагоприятными для начала замера мощности являются положения шнека, когда конечный участок лопасти у разгрузочного торца повернут относительно оси  $z$  на  $52-94^{\circ}$  и  $141-183^{\circ}$ . При начале замера мощности на этих угловых интервалах оборота шнека увеличение числового критерия при заштыбовке будет настолько малым, что критерий или превысит верхнюю границу диапазона его изменений без заштыбовки на незначительную величину, или не превысит ее вообще и заштыбовка шнека не зафиксируется. Это происходит потому, что со смещением момента начала замера мощности во времени происходит постепенное перераспределение временных интервалов с повышенным значением мощности погрузки угля между четвертями периода оборота шнека. Длительность временных интервалов с повышенным значением мощности погрузки угля на первой и третьей четвертях периода оборота шнека становится больше, тогда как на второй и четвертой – меньше. И наступает такой момент ( $75^{\circ}$  и  $165^{\circ}$  по оси абсцисс на рис.3), когда длительности временных интервалов с повышенным значением мощности погрузки угля на первой и третьей четвертях периода оборота шнека, и на второй и четвертой становятся практически одинаковыми. А это означает, что характер протекания процесса заштыбовки на этих четвертях будет одинаковый и отношение средних мощностей двигателя привода резания, замеренных на данных интервалах, не изменится при наступлении заштыбовки.

Из анализа рис.3 следует, что наиболее выгодным положением шнека для момента начала замера мощности будет такое, при котором конечный участок лопасти выходит из зоны скопившегося угля у разгрузочного торца шнека.

Следует отметить, что зависимость между максимальным относительным отклонением числового критерия от среднего значения при заштыбовке и смещением конечного участка лопасти у разгрузочного торца относительно оси  $z$  на момент начала замера мощности является периодической и период ее равен  $90^{\circ}$ . Это объясняется тем, что после смещения момента начала замера мощности во времени на четверть периода оборота шнека характер распределения временных интервалов с повышенным значением мощности погрузки угля по четвертям периода оборота шнека будет таким же, как и без смещения, но зеркально отраженным по отношению к четвертям.

Так как при работе добычного комбайна отсутствует информация о положении шнека на текущий момент времени, то одного значения числового критерия недостаточно для обнаружения системой автоматического управления добычным комбайном заштыбовки шнека. Контролироваться должно семейство значений числового критерия, для каждого из которых момент начала замера мощности должен быть смещен во времени на  $0,008$  с относительно предыдущего. Поскольку после поворота шнека на  $90^{\circ}$  зависимость между максимальным относительным отклонением числового критерия от среднего значения при заштыбовке и смещением положения шнека в момент начала замера мощности повторяется, то достаточно контролировать следующее количество значений числового критерия:

$$\frac{0,25 \cdot T_{\text{шн}}}{0,008} = \frac{0,25 \cdot 0,768}{0,008} = 24, \quad (1)$$

где  $T_{\text{шн}}$  – период оборота шнека, с.

Определение интегрального числового критерия заштыбовки шнека:

$$\left\{ \begin{array}{l} k1_{\text{защ.и}} = \left( \sum_{x=i-T_{\text{усп}}}^i \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_x}{P_{x-0,25 \cdot T_{\text{пер}}}}, \text{ если } \left[ \frac{x}{0,25 \cdot T_{\text{пер}}} \right] - (2 \cdot k + 1); \\ \frac{P_x}{P_{x-0,25 \cdot T_{\text{пер}}}}, \text{ если } \left[ \frac{x}{0,25 \cdot T_{\text{пер}}} \right] - (2 \cdot k) \end{array} \right\} \right) \cdot (T_{\text{усп}})^{-1}, \\ k2_{\text{защ.и}} = \left( \sum_{x=i-T_{\text{усп}}-1}^{i-1} \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_x}{P_{x-0,25 \cdot T_{\text{пер}}}}, \text{ если } \left[ \frac{x-1}{0,25 \cdot T_{\text{пер}}} \right] - (2 \cdot k + 1); \\ \frac{P_x}{P_{x-0,25 \cdot T_{\text{пер}}}}, \text{ если } \left[ \frac{x-1}{0,25 \cdot T_{\text{пер}}} \right] - (2 \cdot k) \end{array} \right\} \right) \cdot (T_{\text{усп}})^{-1}, \\ \dots \dots \dots \\ k24_{\text{защ.и}} = \left( \sum_{x=i-T_{\text{усп}}-23}^{i-23} \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_x}{P_{x-0,25 \cdot T_{\text{пер}}}}, \text{ если } \left[ \frac{x-23}{0,25 \cdot T_{\text{пер}}} \right] - (2 \cdot k + 1); \\ \frac{P_x}{P_{x-0,25 \cdot T_{\text{пер}}}}, \text{ если } \left[ \frac{x-23}{0,25 \cdot T_{\text{пер}}} \right] - (2 \cdot k) \end{array} \right\} \right) \cdot (T_{\text{усп}})^{-1} \end{array} \right. \quad (2)$$

Условие наступления заштыбовки шнека для каждого значения числового критерия:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 k_{1\text{заш.}i} = \begin{cases} 1, & \text{если } (\bar{k}_{1\text{заш}} - 0,082 \cdot \bar{k}_{1\text{заш}}) \leq k_{1\text{заш.}i} \leq (\bar{k}_{1\text{заш}} + 0,082 \cdot \bar{k}_{1\text{заш}}); \\
 0, & \text{если } k_{1\text{заш.}i} < \bar{k}_{1\text{заш}} - 0,082 \cdot \bar{k}_{1\text{заш}} \text{ или } k_{1\text{заш.}i} > \bar{k}_{1\text{заш}} + 0,082 \cdot \bar{k}_{1\text{заш}}, \end{cases} \\
 k_{2\text{заш.}i} = \begin{cases} 1, & \text{если } (\bar{k}_{2\text{заш}} - 0,082 \cdot \bar{k}_{2\text{заш}}) \leq k_{2\text{заш.}i} \leq (\bar{k}_{2\text{заш}} + 0,082 \cdot \bar{k}_{2\text{заш}}); \\
 0, & \text{если } k_{2\text{заш.}i} < \bar{k}_{2\text{заш}} - 0,082 \cdot \bar{k}_{2\text{заш}} \text{ или } k_{2\text{заш.}i} > \bar{k}_{2\text{заш}} + 0,082 \cdot \bar{k}_{2\text{заш}}, \end{cases} \\
 \dots\dots\dots \\
 k_{24\text{заш.}i} = \begin{cases} 1, & \text{если } (\bar{k}_{24\text{заш}} - 0,082 \cdot \bar{k}_{24\text{заш}}) \leq k_{24\text{заш.}i} \leq (\bar{k}_{24\text{заш}} + 0,082 \cdot \bar{k}_{24\text{заш}}); \\
 0, & \text{если } k_{24\text{заш.}i} < \bar{k}_{24\text{заш}} - 0,082 \cdot \bar{k}_{24\text{заш}} \text{ или } k_{24\text{заш.}i} > \bar{k}_{24\text{заш}} + 0,082 \cdot \bar{k}_{24\text{заш}}, \end{cases}
 \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $\bar{k}_{\text{заш}}$  – среднее значение числового критерия заштыбовки шнека, усредненное в течение всей работы добычного комбайна.

Интегральный числовой критерий заштыбовки шнека:

$$k_{\text{заш.}i} = k_{1\text{заш.}i} \cdot k_{2\text{заш.}i} \cdot \dots \cdot k_{24\text{заш.}i}. \quad (4)$$

Условие наступления заштыбовки шнека для интегрального числового критерия:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 k_{\text{заш.}i} = 1 \quad - \text{ нормальная работа шнека;} \\
 k_{\text{заш.}i} = 0 \quad - \text{ заштыбовка шнека.}
 \end{array} \right. \quad (5)$$

**Выводы**

1. Зависимость между максимальным относительным отклонением от среднего значения числового критерия при заштыбовке шнека и угловым смещением первого резца у отрезного диска относительно нижней точки его траектории движения в направлении вращения шнека является периодической. Неблагоприятными положениями шнека для момента начала замера мощности являются такие, при которых первый резец у отрезного диска повернут в направлении вращения шнека относительно нижней точки его траектории движения на  $52-94^0$  и  $141-183^0$ . Наиболее приемлемое положение шнека для начала замера мощности наблюдается тогда, когда конечный участок лопасти выходит из зоны скопившегося угля у разгрузочного торца. В этом случае длительность временных интервалов с повышенным значением мощности погрузки на второй и четвертой четвертях периода оборота шнека будет максимальной.

2. Из-за отсутствия информации о положении шнека на текущий момент времени следует контролировать не одно, а несколько значений числового критерия заштыбовки шнека, для каждого из которых момент начала замера мощности должен быть смещен во времени на 0,008 с относительно предыдущего.

**Список литературы**

1. Ткачев В. В. Алгоритм энергосберегающего управления добычным комбайном / В. В. Ткачев, Н. И. Стадник, А. В. Бубликов // Наук. вісн. НГУ. — 2009. — № 2. — С. 82—89.
2. Позин Е. З. Разрушение углей выемочными машинами / Е. З. Позин, В. З. Меламед, В. В. Тон. — М. : Недра, 1984. — 288 с.
3. Докукин А. В. Статистическая динамика горных машин / А. В. Докукин, Ю. Д. Красников, З. Я. Хургин. — М. : Машиностроение, 1978. — 239 с.
4. Бойко Н. Г. Погрузка угля очистными комбайнами / Н. Г. Бойко — Донецк : ДонНТУ, 2002. — 157 с.
5. Ткачев В. В. Определение заштыбовки шнекового исполнительного органа малого диаметра добычного комбайна на основе статистического анализа мгновенных значений нагрузки на валу электродвигателя привода резания / В. В. Ткачев, А. В. Бубликов // Акад. вестн. Криворожск. терриг. отд-ния Междунар. акад. компьютерных наук и систем. — 2007. — № 20. — С. 40—46.

*Рекомендовано до друку проф. Ткачевим В.В.*