

## СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ЗАВИСАНИЯ СОСУДА ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

*Н.А. Чехлатый, ПАО «НИИ ГМ им. М.М. Федорова», Украина*

Приведены основные методы контроля напуска каната в ствол, выполнен анализ существующих средств контроля. Предложена математическая модель датчика напуска каната, рассмотрена его структурная схема и выполнены экспериментальные исследования датчика.

**Проблема и ее связь с научной или практической задачей.** При эксплуатации шахтных подъемных установок (ШПУ) средний показатель возникновения основных видов аварии таковой: 9.6% – жесткая посадка на кулаки; 34.4 % – зависание в стволе; 12.7% – зависание сосуда в разгрузочных кривых; 7.5 % – сход каната со шкива; 32.8% – выкатывание вагонетки из клетки и 2.9 % – прочие [1]. Как видно из изложенного, наиболее часто встречающиеся аварии – это зависание опускающегося сосуда в стволе шахты и как, следствие, при дальнейшем вращении барабана и сматывании каната – напуск каната на сосуд. Такая авария опасна тем, что при срыве сосуда с места зависания резко выбирается напуск каната, что может привести к его обрыву или, как минимум, к деформации, т.е. к аварийному простою шахтной подъемной установки (ШПУ), а на клетевых подъемах и к гибели людей.

Эксплуатационная надежность ШПУ определяет безопасность производства и влияет на важнейшие экономические показатели предприятия, а недостаточная эффективность работы оборудования приводит к значительным производственным затратам.

Поэтому разработка устройств контроля напуска каната, обеспечивающих снижение числа аварийных ситуаций в стволе шахты и повышающих безопасность эксплуатации ШПУ, является решением актуальной задачи.

**Анализ исследований и публикаций.** Разработка и внедрение автоматических средств контроля и управления подъемными установками занимает определенное место в комплексе мероприятий по предотвращению аварий и травматизма. Автоматически контролируются скорость и положение подъемного сосуда в стволе, возникновение напуска каната, положение ствольных дверей и посадочных устройств. Решению вопроса повышение эффективности и безопасности эксплуатации ШПУ путем внедрения устройств контроля напуска каната уделяется достаточно внимания [2].

Анализируя различные способы контроля напуска, их можно объединить в две группы: по верхней части каната и по всей его длине. В первом случае, в момент образования напуска, контролируется провисание струны каната, а во втором – образование напуска каната над сосудом.

Указанные методы контроля напуска имеют свои преимущества и недостатки. Так, контроль напуска по провисанию струны каната прост, надежен в эксплуатации и обеспечивается при длине отвеса каната, не превышающей 150 м.

Для контроля напуска каната по всей длине ствола на угольных шахтах разработана аппаратура: повышающая безопасность эксплуатации подъемной установки КТС БПУ, контроля напуска (наклона) каната АКНК-1 (НПП «УШС», Украина), ствольной сигнализации и связи АСС-Днепр (ООО НПП «Альянс-Д», Украина), контроля напуска каната АПИК-2 (Россия), ствольной сигнализации и связи фирмы «FHF» (Германия). В аппаратуре при передаче информации о напуске каната используется принцип эфирной радиосвязи. Указанные технические средства контроля выполняют аналогичные функции и отличаются выбором частот и исполнением датчика напуска каната. Сигналы от датчиков по радиоканалу поступают в схему управления и сигнализации подъемной установки. Конструктивно датчики выполнены с установкой непосредственно на канат у подъемного сосуда или на балке подвесного устройства и, при колебаниях каната в горизонтальной плоскости, перпендикулярной направлению движения, возникает ошибка измерения, пропорциональная текущему ускоре-

нию в этой плоскости.

Для повышения эффективности эксплуатации ШПУ одной из главных задач является непрерывный контроль напуска каната, с компенсацией нестабильности показаний чувствительного элемента в сложных условиях ствола шахты (широкий температурный диапазон, большие скорости и ускорения, необходимость стабильной работы в аварийных условиях).

**Целью работы** является совершенствование методов и средств направленных на повышение эффективности эксплуатации ШПУ путем создания современных технических средств, обеспечивающих контроль наклона и напуска каната, с надежной и стабильной работой в аварийных условиях.

**Изложение основного материала и результаты.** При постановке сосуда на жесткую опору возникает эксплуатационный напуск каната, а при заклинивании опускаемого сосуда в стволе – аварийный. Эксплуатационный напуск контролируется с той целью, чтобы снизить динамические переходные процессы при посадке клетей на жесткие основания (кулаки).

В [3] предложен способ посадки - снятия подъемного сосуда с жесткого основания, в соответствии с которым система регулирования электропривода, при снятии сосуда с жесткого нижнего основания, обеспечивает отрицательный напуск каната у прицепного устройства, удовлетворяющее следующему условию:

$$h_{\text{нап1}} = -10m_1gL_{01}/A \quad (1)$$

где  $A$  – агрегатная продольная жесткость каната,  $m_1$  – масса поднимаемого груженого сосуда,  $L_{01}$  – длина отвеса,  $g$  – ускорение свободного падения, а при снятии порожнего сосуда с жесткого верхнего основания отрицательный напуск каната у прицепного устройства удовлетворяет следующий условию:

$$h_{\text{нап2}} = -10m_2gL_{02}/A \quad (2)$$

где  $m_2$  – масса опускаемой порожней клетки,  $L_{02}$  – длина отвеса.

При посадке груженого сосуда на жесткое верхнее и нижнее основания напуск каната у прицепного устройства соответствует соотношениям (1) и (2). Реализация напуска каната, при котором днище сосуда едва касается кулаков, а сосуд удерживается в таком положении механическим тормозом или противовключенным электродвигателем (при регулируемом приводе) в течение разгрузочно-погрузочных операций, приводит к наилучшему в динамическом смысле режиму снятия сосуда с кулаков.

Аварийный напуск каната контролируется для того, чтобы в момент его образования произвести своевременную остановку подъемной машины и избежать падения сосуда с высоты. Основным методом контроля зависания подъемного сосуда, применяемый в настоящее время на шахтных подъемных установках, это контроль натяжения или наклона каната. Датчики контроля натяжения каната крепятся непосредственно на канате выше подвесного устройства и, по конструктивному исполнению, выполнены трех- и двухопорными. К недостатку таких датчиков следует отнести необходимость их периодической подстройки, вызванной изменениями технических характеристик каната в процессе его эксплуатации.

В НИИ ГМ имени М.М.Федорова разработан датчик контроля наклона каната ДНК [4]. На рисунке 1 показана структурная схема (а) и один из вариантов конструктивного исполнения датчика наклона (б).

После установки датчика на головной канат и подаче напряжения питания начинается выполнение управляющей программы микроконтроллера МК, который формирует тестовые сигналы для магниточувствительных микросхем ЧЭ1 и ЧЭ2, трёхосевого гироскопа Г и трёхосевого акселерометра А, а также сигналы управления источниками опорного напряжения ИОН1 и ИОН2. После этого происходит считывание информации с аналоговых входов МК с последующим анализом исправности.

После исполнения команды тестирования выполняется калибровка датчика путём нажатия кнопочного выключателя КН (головной канат без провисаний в этот момент должен быть разгружен, т.е. подъёмный сосуд установлен на жёсткое основание). В этом режиме МК опрашивает все информационные входы, определяя исходное состояние устройства.

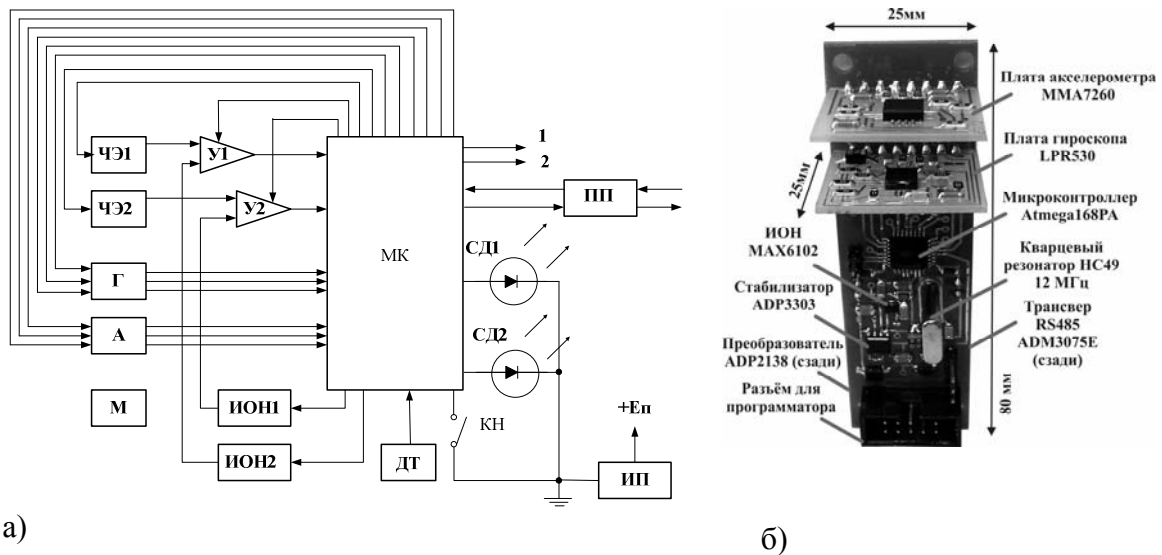


Рисунок 1 Структурная схема (а) и один из вариантов конструктивного исполнения датчика наклона (б)

Анализируя информацию с выходов трёхосевого гироскопа Г, трёхосевого акселерометра А и датчика температуры ДТ микроконтроллер МК выполняет измерение текущих показаний для данного режима. Одновременно происходит подстройка коэффициентов усиления усилителей У1 и У2 путём изменения коэффициентов усиления и величин сигналов управления на выходах источников опорного напряжения ИОН1 и ИОН2. После установки исходного состояния кнопочный выключатель КН отключается, в результате чего устройство подготовлено к работе.

После снятия сосуда с жёсткого основания датчиком натяжения каната, с помощью магниточувствительных микросхем ЧЭ1 и ЧЭ2 (например, датчики Холла с усилителями), измеряется натяжение каната по величине изменения магнитного поля, создаваемого магнитом М.

С помощью трёхосевого гироскопа Г и трёхосевого акселерометра А измеряется текущее положение каната относительно вертикали. Микроконтроллер МК сравнивает текущие показания с калибровочными, определяя угол наклона. При этом с помощью трёхосевого гироскопа Г и датчика температуры ДТ происходит корректировка показаний акселерометра А. В основе алгоритма определения угла наклона (АУН) лежит интегрирование ускорений и угловых скоростей. Акселерометр измеряет проекции кажущегося ускорения на свои оси чувствительности, гироскоп – абсолютную угловую скорость.

Для выделения полезного сигнала датчиков из аддитивной помехи (основой которой являются собственные частоты колебаний каната, вибрации при движении и удары) строится оптимальная передаточная функция фильтра.

В общем случае модель линейной системы может быть представлена в пространстве состояний двумя уравнениями [5, 6]:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A_k x_k + B_k u_k + w_k, \\ y_k &= C_k x_k + z_k. \end{aligned} \quad (3)$$

где  $A_k, B_k, C_k$  – матрицы, причём  $A_k$  – квадратная,  $x_k$  – вектор переменных состояния системы,  $u_k$  – известный вектор входных переменных,  $y_k$  – измерения, полученные в момент времени  $t_k$  (выход системы),  $w_k, z_k$  – шумы соответственно процесса и результатов измерений.

Фильтр Калмана работает по принципу «оценка – коррекция». Пусть в момент времени  $t_k$  получена оценка вектора состояния системы  $x_k$ , а нужно получить оценку в точке  $t_{k+1}$ .

Строится прогноз оценки  $\hat{x}_{k+1}$ , базируясь на  $x_k$ , получаются измерения  $y_k$  с последующей коррекцией оценки состояния системы  $\hat{x}_{k+1}$  в момент  $t_{k+1}$  по прогнозу и измерениям. Так получается окончательная оценка вектора состояния  $\hat{x}_{k+1}$  в момент времени  $t_{k+1}$ . Принято  $\hat{x}_{k+1}$  называть априорной оценкой, а  $\hat{x}_{k+1}$  – апостериорной.

В случае моделирования движения подъёмного каната вектор состояния системы «датчик – канат» в простейшем случае можно сократить до двух компонент: текущего угла наклона и угловой скорости (корпуса датчика). Вход системы – угловая скорость  $\omega_k$ , а выход – измеренный угол наклона  $\theta_k$ . Угол наклона на шаге  $t_{k+1}$  задаётся следующим уравнением:

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \omega_k dt + \bar{\theta}_k, \quad (4)$$

где  $\omega_k$  – результат измерения угловой скорости в момент времени  $t_k$ ,  $\bar{\theta}_k$  – шумы системы.

Учитывая, что вектор состояния системы  $x_k = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix}$ , можно записать уравнения состояния системы (3) в матричной форме

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \begin{bmatrix} \theta_{k+1} \\ \omega_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} u_k + w_k, \\ y_{k+1} &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix} + z_k. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученный АУН должен удовлетворять двум свойствам: а) среднеквадратичное значение ошибки алгоритма должно «совпадать» с ошибкой самой системы [5, 6], б) алгоритм должен обладать минимальной собственной ошибкой или вариацией.

Поэтому предполагают, что нормальное значение  $w_k = 0$ ,  $z_k = 0$ . Более того, не должно существовать корреляции между  $w_k$  и  $z_k$ . Второй момент случайного процесса описывается в терминах ковариационной матрицы

$$\begin{aligned} S_w &= E(w_k w_k^T), \\ S_z &= E(z_k z_k^T), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $S_w, S_z$  – ковариационные матрицы ошибки оценки вектора состояния,  $z_k^T, w_k^T$  – транспонированные матрицы случайных шумов,  $E(\ )$  – ожидаемое среднеквадратичное значение ошибки.

Уравнения фильтра Калмана получаются интегрированием модельной динамической системы уравнений

$$\begin{aligned} K_k &= AP_k C^T (CP_k C^T + S_z)^{-1}, & (\hat{a}) \\ \hat{x}_{k+1} &= (A\hat{x}_k + Bu_k) + K_k (y_{k+1} - C\hat{x}_k), & (\hat{a}) \\ P_{k+1} &= AP_k A^T + S_w - AP_k C^T S_z^{-1} CP_k A^T, & (\hat{a}) \end{aligned} \quad (7)$$

где  $K_k$  – коэффициент усиления фильтра (или матрица коэффициентов обратной связи),  $P_k$  – ковариация ошибки прогнозирования.

Система (5-7) симулировалась в среде Matlab с помощью генератора случайных чисел. В результате был сделан вывод, что соответствующим образом настроенный фильтр Калмана

обладает необходимыми свойствами подавления случайных выбросов в показаниях первичных датчиков.

Датчик обеспечивает измерение наклона канта и позволяет исключить ошибку измерения, обусловленную наложением вертикальных и горизонтальных колебаний каната. Кроме того введение датчика температуры позволяет исключить ошибку измерения наклона каната путём корректировки результатов измерений с учётом текущего значения температуры для каждого измерения в реальном времени.

**Выводы.** В работе решена научная задача разработки средств контроля зависания сосуда шахтной подъемной установки. Предложена математическая модель датчика контроля наклона каната, выполнены экспериментальные исследования характеристик опытного образца

Шахтные испытания датчика в составе комплекса КТС БПУ подтвердили правильность выбранного направления исследований. Предлагаемые технические решения позволяют повысить эффективность и безопасность эксплуатации ШПУ.

### Список литературы

1. Латыпов И. Н. Обоснование и обеспечение безопасной эксплуатации шахтных барабанных подъемных установок: дис. д-ра техн. наук – Екатеринбург, 2008.

2. Грядущий Б. А. Комплекс технических средств для повышения безопасности эксплуатации подъемных установок / Б. А. Грядущий, В. И. Мялковский, Н. А. Чехлатый // Уголь. – 2010. – № 7. – С. 33.

3. Пат. 91268 Україна, МПК<sup>7</sup> В66В 5/14. Спосіб посадки-зняття підйомної судини з жорсткої підстави і пристрій для його здійснення / М. О. Чехлатий, В. І. Дворніков. – № а 2008 11420; заявл. 22.09.08; опубл. 12.07.10, Бюл. № 13. – 6 с.

4. Пат. 97929 Україна, МПК В66С 13/04. Пристрій для виміру натягу та нахилу каната / М. О. Чехлатий, А. Ю. Грицаєнко, С. О. Євсюков та ін. – № а 2011 08953; заявл. 18.07.11; опубл. 10.02.12, Бюл. № 3. – 6 с.

5. Басараб М. А. Математическое моделирование физических процессов в гироскопии. Монография / М. А. Басараб, В. Ф. Кравченко, В. А. Матвеев. – М.: Радиотехника, 2005. – 176 с.

6. Балакришнан А. Теория фильтрации Калмана: пер. с англ. / А. Балакришнан. – М.: Мир, 1988. – 168 с.