

Чехлатый Н.А., канд. техн. наук, **Грицаенко А.Ю.**, аспирант,
Мялковский В.И., канд. техн. наук (НИИГМ им М.М. Федорова), **Чехлатый А.Н.** (Профин-Банк)

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ЗАВИСАНИЯ СОСУДА ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

Виконаний аналіз існуючих систем контролю та управління шахтними підіймальними установками, наведені основні методи контролю напуску каната в стовбур. Запропонована математична модель датчика нахилу каната та виконані експериментальні дослідження. Розглянуто структурну схему пристрою контролю нахилу та напуску каната.

Выполнен анализ существующих систем контроля и управления шахтными подъемными установками, приведены основные методы контроля напуска каната в ствол. Предложена математическая модель датчика наклона каната и выполнены экспериментальные исследования. Рассмотрена структурная схема устройства контроля наклона и напуска каната.

Given the analysis of the existing systems of the control and management of the mining hoisting units, observed the main methods of the control of the rope lapping in the shaft. Suggested the mathematical model of the sensor of the rope bend and fulfilled the experimental investigation. Examined the structural scheme of the device of the bend control and rope lapping.

КС: шахтная подъемная установка, шахтные канаты, контроль, наклон и напуск каната, зависание, шахтный ствол, безопасность, режимы работы, параметры процессов.

Проблема и ее связь с научной или практической задачей. Почти четверть несчастных случаев при подземной разработке угольных месторождений приходится на рудничный транспорт и еще 2-3% – на подъем. Отсюда понятна важность надежной постановки задачи контроля и управления в этом звене безопасности, особенно, если иметь в виду, что аварии на шахтном подъеме потенциально весьма опасны и могут повлечь за собой групповой травматизм. При эксплуатации шахтных подъемных установок (ШПУ) средний показатель возникновения основных видов аварии таков: 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, 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 простоя 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. В соответствии с требованиями Правил безопасности в угольных шахтах (р. VII, п. 7 ж) подъемная установка должна быть оборудована устройствами для защиты от напуска каната. 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 вопросов повышения эффективности и безопасности эксплуатации ШПУ путем внедрения устройств контроля напуска каната учеными уделяется достаточно внимания [1, 2, 3].

Анализируя различные способы контроля напуска каната, их можно объединить в две группы: контроль 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 как свои преимущества, так и недостатки. Так, контроль напуска по провисанию струны каната прост, надежен в эксплуатации и обеспечивается при условии [1]

$$H_0 \leq \frac{L_C \cdot \sin \beta + \frac{f_0 d_0}{D_{ш}} \left(L_C \cdot \sin \beta + \frac{P_{ш}}{p} \right) - \frac{GD^2}{D_{ш}^2} \frac{j}{g}}{2 + \frac{j}{g} - \frac{f_0 d_0}{D_{ш}} - e^f - \xi_{ж}},$$

где H_0 – длина отвеса каната, L_C – длина струны каната, β – угол наклона струны каната к горизонту, f_0 – коэффициент трения между втулкой и осью шкива; d_0 – диаметр оси шкива, $D_{ш}$ – диаметр шкива, $P_{ш}$ – абсолютный вес шкива, GD^2 – маховой момент шкива, j – замедление движения каната, g – ускорение силы тяжести; e – основание натуральных логарифмов; f – коэффициент трения между канатом и ободом шкива; φ – угол обхвата шкива каната, рад; $\xi_{ж}$ – коэффициент жесткости каната.

Коэффициент жесткости каната при напуске может быть определен из выражения

$$\xi_{ж} \approx 125 \cdot 10^{-6} d_K \left(\frac{1+p}{p} \right),$$

где d_K – диаметр каната, мм.

Данный метод контроля напуска применим при длине отвеса каната, не превышающей 150 м.

Для контроля напуска каната по всей длине ствола на угольных шахтах разработана аппаратура: 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, и при колебаниях каната в горизонтальной плоскости, перпендикулярной направлению движения, возникает ошибка измерения, пропорциональная текущему ускорению в этой плоскости.

Кроме того, величина ошибки устройства измерения напуска зависит от температуры окружающей среды.

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 непрерывный контроль наклона и напуска каната, с надежной и стабильной работой в аварийных условиях.

Изложение основного материала и результаты исследований. При постановке сосуда на жесткую опору возникает эксплуатационный напуск каната, а при заклинивании опускаемого сосуда в стволе – аварийный. Эксплуатационный напуск контролируется с целью снижения динамических переходных процессов при посадке клетей на жесткие основания (кулаки).

В [7] 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, удовлетворяющий 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 такому 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 конструктивно выполнены трех- и двухопорными. К недостатку таких датчиков следует отнести необходимость их периодической подстройки, вызываемой изменениями технических характеристик каната в процессе его эксплуатации.

Новой тенденцией в современной электронике является микросистемная техника, благодаря которой стало возможным создание миниатюрных интегрированных устройств управления и датчиков. Микромеханические системы (МЭМС) – это совокупность классических электронных и механических элементов в микроисполнении, выполненных, как правило, в виде одной группы на одной подложке полупроводника. При этом механические элементы могут преобразовывать сигнал какого-либо воздействия на всю систему или отдельную её часть в механическое перемещение, а интегрированная электроника обеспечивает необходимую обработку. Благодаря растущей популярности и ускоряющемуся конструированию приборов такого класса возникла возможность создавать интеллектуальные датчики с микро- и наномеханическими чувствительными элементами, построенными на вибрационных, волновых или оптических принципах.

В инерциальных МЭМС, пригодных для решения задач контроля напуска каната, типовым элементом являются балка и микроструктуры на её основе в виде решёток монокристалла (рис. 1).

Для автономного определения положения малых подвижных объектов применяются гироскопы и акселерометры. При этом гироскопы должны соответствовать классу точности не ниже $0,5 \div 1^\circ / \text{час}$, т.е. систематический дрейф должен быть не выше $1,4 \cdot 10^{-4} \div 2,8 \cdot 10^{-4}^\circ / \text{сек}$. Класс точности доступных для широкого использования современных МЭМС гироскопов – порядка $0,01 \div 0,1^\circ / \text{сек}$. Подобный «уход» и другие параметры неидеального гироскопа требуют компенсации с помощью акселерометра. Кроме систематического дрейфа ($^\circ / \text{сек}$) важны также случайный дрейф ($^\circ / \text{сек}$), крутизна характеристики ($\text{мВ} / ^\circ / \text{сек}$), частотный диапазон гироскопа

(Гц), температурный дрейф ($^{\circ}/^{\circ}\text{C}/\text{сек}$), собственные шумы, способность к подавлению вибраций. Последнее свойство МЭМС гироскопов с математической точки зрения зависит от динамики самого чувствительного элемента. Например, на рис. 2а показан циклический уход нуля нетермостатированного гироскопа ADXRS453, на 2б – реакция гироскопа CRG20-01 на вибрации в широком диапазоне частот (по данным производителей).

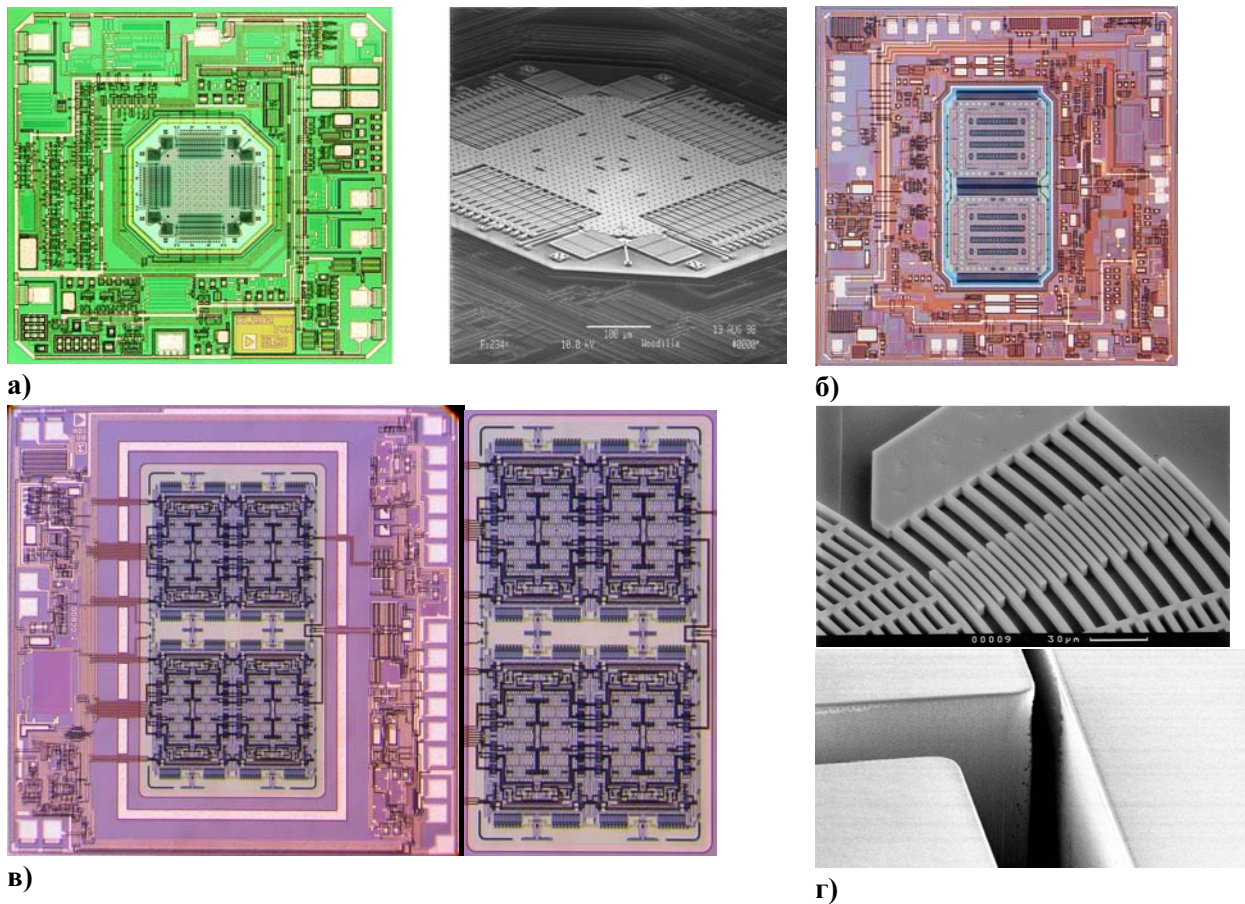


Рис. 1. Микроснимки МЭМС акселерометра ADXL202 (а), МЭМС гироскопов ADIS16100 (б) и ADXRS64x с разделёнными массами (в), масштабы типовых конструкции серийных вибрационных гироскопов (г)

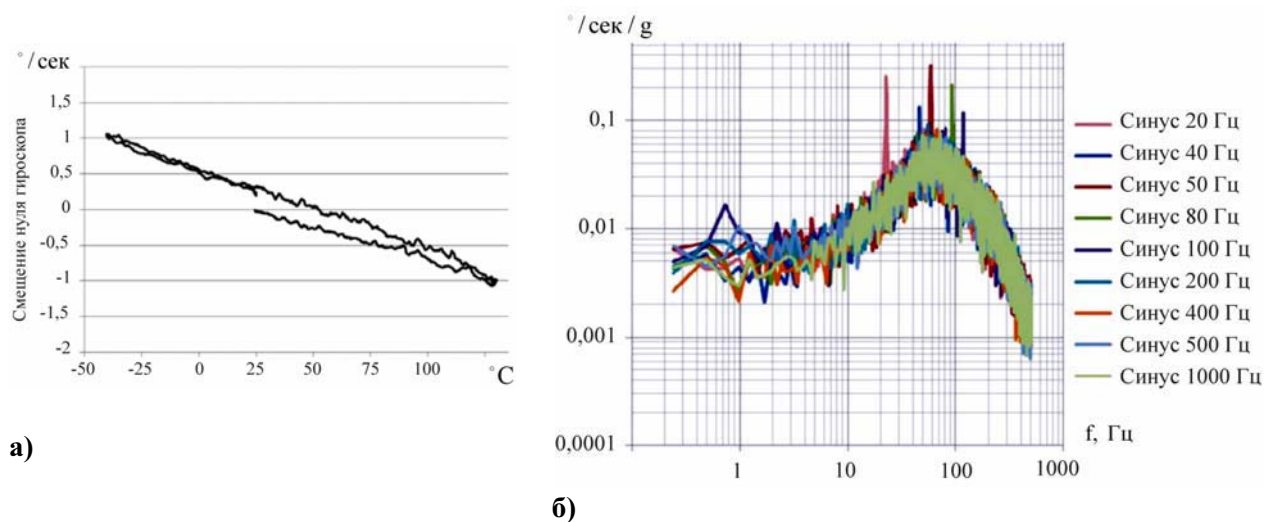


Рис. 2. Кривая температурного гистерезиса гироскопа ADXRS453 при некомпенсированном смещении нуля (а), реакция гироскопа CRG20-01 на асимметричные осям прибора ускорения и вибрации (б)

Недостаток информации о добротности колебательной системы, АЧХ прибора, собственных частотах колебаний рамок подвеса, величин случайного дрейфа угловой скорости может быть компенсирован применением соответственно подобранных цифровых фильтров. Вместе с тем масштабный коэффициент преобразования угловой скорости в выходной сигнал системы съёма (аналоговый или цифровой) находится в технической документации.

В свою очередь к акселерометру предъявляются не столь строгие требования. Так, рабочий диапазон линейных ускорений МЭМС акселерометра может быть вблизи $1 \div 2g$, а возможные перегрузки при больших ускорениях компенсируются выносливостью прибора (как правило, для МЭМС приборов с сосредоточенными параметрами – $10000 \div 30000g$).

Исходя из изложенного, можно выделить следующие шаги разработки датчика угла наклона каната:

- разработка механической конструкции и электронных схем устройства (креплений, демпферов, выбор элементной базы, способа передачи информации к вышестоящим блокам систем безопасности и т.д.);
- разработка математической модели датчика на испытательном стенде с учётом всех внешних возмущений, обусловленных вибрациями и ударными перегрузками (например, в моменты посадки/снятия сосуда с оснований);
- доводка и численное интегрирование полученной математической модели, оптимизация итерационных процессов для систем реального времени;
- лабораторные и натурные испытания, дальнейшее улучшение динамических характеристик датчика (быстродействия и достоверности срабатывания);
- оценка погрешностей измерений и путей их уменьшения (например, переход на другую элементную базу или увеличение быстродействия).

Конструктивно датчик наклона каната выполняется в стальном корпусе, соизмеримым по диаметру с канатом. Крепления в виде хомутов обеспечивают надёжную и долговременную фиксацию. Внутри корпуса расположена плата на резиновых креплениях для уменьшения вибраций в экспериментально определённом спектре частот. На плате располагаются микроконтроллер с необходимыми вычислительными возможностями, гироскоп и акселерометр, ориентированные специальным образом, преобразователь напряжения для получения максимального КПД при питании от аккумуляторов.

Инерциальная часть датчика состоит из трёхосных (двухосного) гироскопа и акселерометра. Акселерометр измеряет проекции кажущегося ускорения на свои оси чувствительности, гироскоп – абсолютную угловую скорость. Алгоритм определения угла наклона (АУН) строится на базе измерений акселерометра и гироскопа. В основе АУН лежит интегрирование ускорений. В данном случае объект измерений – движущийся канат, а ускорения интегрируются в проекциях на выбранную систему координат. Для текущей задачи подходит ортогональная локальная система координат с направленной по канату одной из осей (рис. 3).

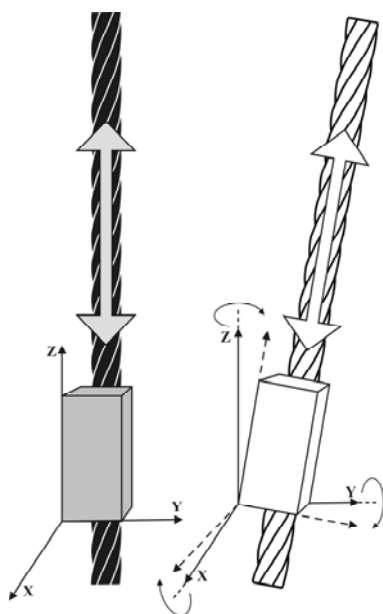


Рис. 3. Расположение датчика наклона на канате

Оси чувствительности акселерометра датчика образуют с канатом связанную систему координат. Выходной сигнал по всем трём осям является проекцией кажущегося ускорения на оси локальной системы координат, т.е. это разница между абсолютным и гравитационным ускорениями. Основная сложность заключается в том, что в объект измерения акселерометра входит информация об абсолютном и гравитационном ускорениях. Абсолютное ускорение содержит информацию о движении каната относительно земли и его собственном вращательном движении. Гравитационное же ускорение всегда известно. Измерения акселерометра

представляют собой аналоговый сигнал, на выходе которого предусмотрена компенсация ошибок акселерометра. В этой части модели компенсируются смещение нуля акселерометра, погрешность установки, а также нестабильность масштабного коэффициента вследствие воздействия больших линейных ускорений, крутильных и продольных колебаний каната.

Численная реализация АУН для микроконтроллера по дискретным значениям угловой скорости вибрационного гироскопа и углового перемещения акселерометра является задачей нетривиальной, вследствие высокого уровня помех в широкой полосе частот (вибрации, шумы квантования аналого-цифрового преобразователя, погрешности приборов, вызванные воздействием парциальных частот колебаний системы «подъёмный сосуд – канат»).

Инерциальные чувствительные элементы выдают информацию о приращении углов и угловых скоростей с высокой частотой от 100 до 1000 Гц, чего достаточно для реализации датчика с быстродействием 10 – 50 мс и контроля аварийного напуска каната. Для выделения полезного сигнала датчиков из аддитивной помехи (основой которой являются собственные частоты колебаний каната, вибрации при движении и удары) существенную роль играет рекурсивная фильтрация. Одним из подходов к данной задаче является калмановская фильтрация. Имея модель системы и экспериментально определённые статистические свойства сигналов и помехи, можно построить оптимальную передаточную функцию фильтра, минимизировав среднеквадратичную ошибку определения угла.

Структуру канала измерения датчика по одной оси можно представить схемой рис. 4.

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, который является случайным Гауссовским процессом; u_k – известный вектор входных переменных; y_k – измерения, полученные в момент времени t_k (выход системы); w_k, z_k – шумы соответственно моделируемого процесса и результатов измерений.

Вектор x_k содержит всю информацию о текущем состоянии динамической системы, но не поддаётся непосредственному

измерению. Измеряется вектор y_k , каждая составляющая которого в общем случае является функцией вектора x_k и шумов измерений z_k . Поэтому можно использовать y_k для оценки вектора состояния системы x_k . Шумы системы и измерений w_k и z_k также являются Гауссовскими случайными процессами с нулевым математическим ожиданием (белый шум). Задачей фильтрации является нахождение оценки вектора состояния системы x_k , являющейся функцией измерений y_k , которая минимизировала бы среднеквадратичную ошибку.

Фильтр 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

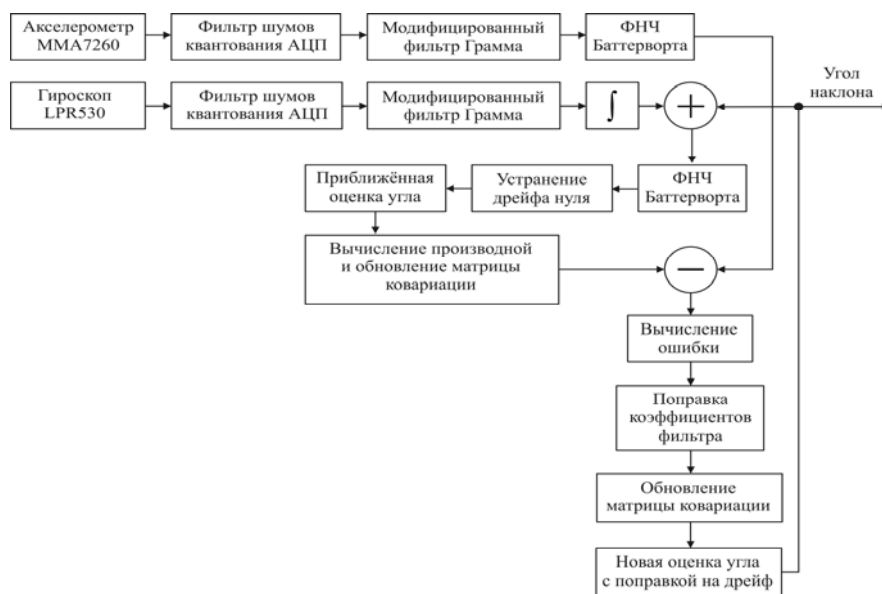


Рис. 4. Схема вычисления угла наклона с использованием рекурсивного фильтра Калмана в датчике угла наклона каната

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. Принято \hat{x}_{k+1} называть априорной оценкой, а \bar{x}_{k+1} – апостериорной.

В случае моделирования движения датчика наклона и подъёмного каната вектор состояния системы «датчик – канат» в простейшем случае можно сократить до двух компонент: текущего угла наклона и угловой скорости (корпуса датчика относительно ортогональной системы координат, связанной с канатом). Вход системы ω_k – угловая скорость, а выход – измеренный угол наклона θ_k . Предположим, что мы в состоянии измерять угловую скорость и угол наклона с периодом dt секунд. Тогда угол наклона на шаге t_{k+1} задаётся следующим уравнением:

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

где ω_k – результат измерения угловой скорости в момент времени t_k , т.е. текущий угол равен углу на предыдущем этапе измерений плюс текущее значение угловой скорости, умноженное на длину временного интервала измерения. Но предыдущее уравнение не даёт точного значения угла наклона ввиду наличия упомянутых ранее случайных процессов и шумов, меняющихся со временем. Поэтому более реалистичное уравнение запишется так:

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

где $\bar{\theta}_k$ – шумы системы.

Учитывая, что вектор состояния системы $x_k = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix}$, можно записать уравнения состояния системы (1) 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:

- среднеквадратичное значение ошибки алгоритма должно «совпадать» с ошибкой самой системы;
- алгоритм должен обладать минимальной собственной ошибкой или вариацией.

Именно фильтр Калмана является идеальным средством оценки, удовлетворяющем двум свойствам выше. Но для использования калмановских алгоритмов нужно наложить некоторые ограничения на характер относительно шума, воздействующего на систему. Из модели w_k – шум динамической системы «датчик – канат», z_k – шум процесса измерений. Предположим, что нормальное значение $w_k = 0$, $z_k = 0$. Более того, не должно существовать корреляции между w_k и z_k (т.е. это независимые случайные переменные в любой момент t_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; $E(\cdot)L$ – ожидаемое среднеквадратичное значение ошибки.

Опуская интегрирование модельной динамической системы уравнений (3), запишем непосредственно уравнения фильтра Калмана:

$$K_k = AP_k C^T (CP_k C^T + S_z)^{-1}, \quad (a)$$

$$\hat{x}_{k+1} = (A\hat{x}_k + Bu_k) + K_k (y_{k+1} - C\hat{x}_k), \quad (б) \quad (7)$$

$$P_{k+1} = AP_k A^T + S_w - AP_k C^T S_z^{-1} CP_k A^T, \quad (в)$$

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

В уравнении (7а) с ростом шумов измерений растёт ковариационная матрица S_z , а это значит, что коэффициент усиления фильтра будет уменьшаться вместе с достоверностью оценки состояния системы, т.е. эта матрица коэффициентов является функцией от априорного значения ковариационной матрицы ошибки. С уменьшением S_z достоверность прогнозирования растёт.

Первое слагаемое в уравнении (7б) повторяет модель линейной системы (3) при отсутствии средств измерения. Второе слагаемое (7б) называется коррекционным членом и показывает, насколько необходимо скорректировать прогнозируемое значение интересующей величины в соответствии с текущим измерением.

На рис. 5 показаны результаты моделирования системы (4) с условиями Калмана (7) в среде Matlab для одной плоскости измерений. В качестве ковариаций S_z , S_w брались квадраты скалярных значений соответствующих шумов S_z , S_w . Сама линейная система симулировалась на каждом шаге с помощью генератора случайных чисел.

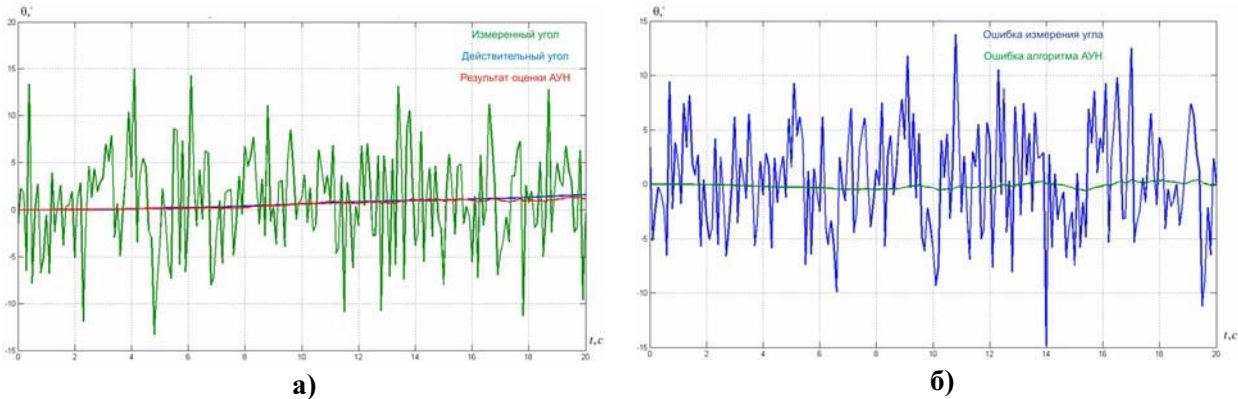


Рис. 5. Результаты моделирования АУН с фильтром Калмана в среде Matlab (а), сравнение абсолютной ошибки измерения угла с выходом фильтра (б) для одной плоскости измерений

Из приведенных рисунков видно, что соответствующим образом настроенный фильтр обладает необходимыми свойствами подавления случайных выбросов в показаниях первичных датчиков.

Ниже показаны результаты экспериментальных исследований. На рис. 6а показана зависимость ухода нуля гироскопа LPR530 от времени по одной из осей, а на рис. 6б – нормальная работа и нежелательная реакция этого же гироскопа на линейные ускорения до 3g и вибрации в диапазоне частот до 1 кГц на испытательном стенде.

В НИИГМ им. М.М.Федорова разработан и успешно эксплуатируется на угольных шахтах Украины комплекс технических средств безопасности шахтных подъемных установок КТС БПУ [7]. В состав комплекса входят устройство приема и передачи информации с клетки СКРС–1Д, датчики контроля срабатывания парашюта и напуска каната в вертикальном стволе и устройство звуковой сигнализации. Комплекс КТС БПУ предназначен для предотвращения напуска каната в ствол путем контроля угла наклона каната и срабатывания парашютных устройств, передачи информации от датчиков напуска и наклона каната ДННК, срабатывания парашюта ДСП и представления информации машинисту подъема.

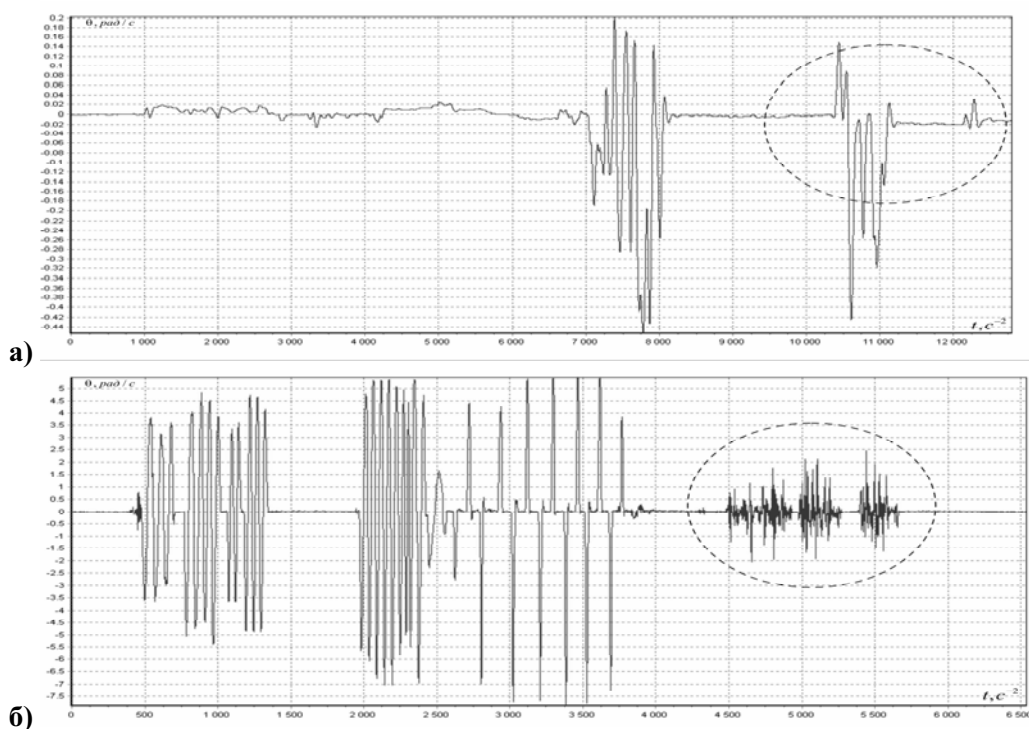


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований гироскопа LPR530 в составе датчика наклона каната без компенсации алгоритма АУН (а), то же с компенсацией дрейфа и воздействием вибраций (б)

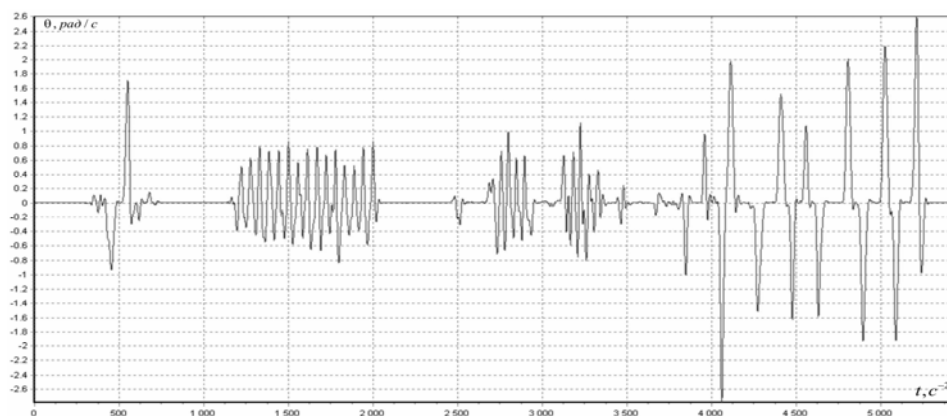


Рис. 7. Данные гироскопа LPR530 с правильно подобранными коэффициентами фильтра АУН. Частота среза ФНЧ – 100 Гц в соответствии с необходимой характеристикой быстродействия датчика

На рис. 8а изображена блок-схема датчика контроля напуска и наклона каната [8], а на рис. 8в показан один из вариантов конструктивного исполнения датчика наклона, прошедшего успешные испытания на шахте. После установки датчика на головной канат и подачи 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. 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.

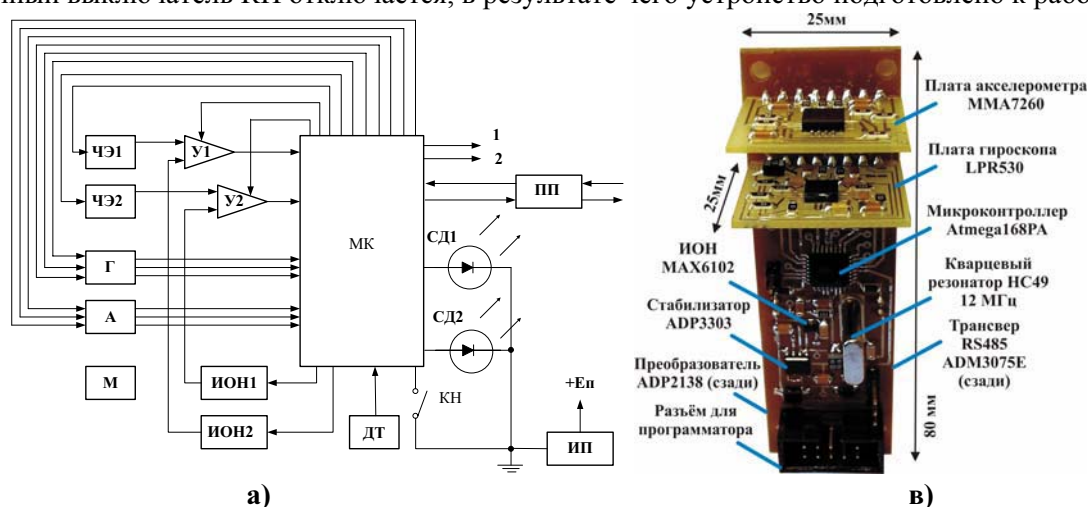


Рис. 8. Датчик контроля наклона и напуска каната

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, возникающих при наложении горизонтальных и вертикальных колебаний на результаты измерений.

На основании анализа полученных данных производятся вычисления в реальном времени текущего угла отклонения каната от вертикальной оси, а также натяжения каната, которые поступают на цифровой приёмопередатчик ПП, а аналоговые значения натяжения в кН или кг и угла наклона в градусах или радианах поступают соответственно на аналоговые выходы 1 и 2 микроконтроллера МК.

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

На рис. 9 изображена блок-схема устройства для контроля напуска каната и срабатывания парашюта на клетевом подъёме.

Устройство контроля напуска каната и

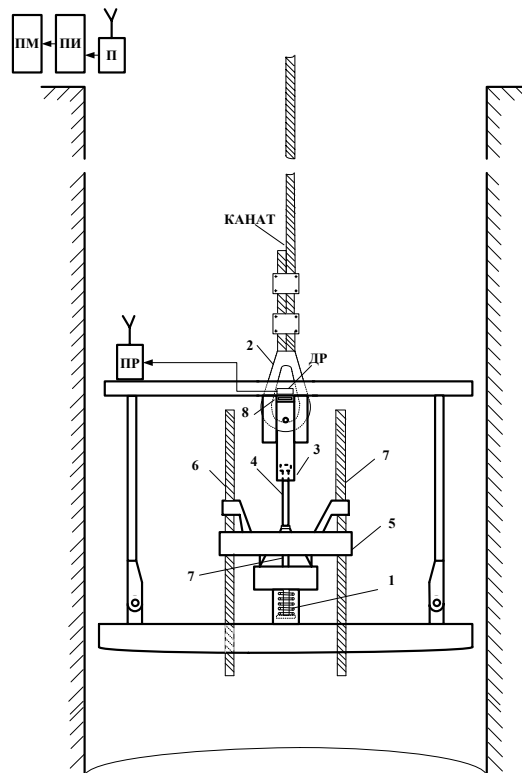


Рис. 9. Устройство контроля напуска каната и срабатывания парашюта на клетевом подъёме

срабатывания парашюта на клетевом подъеме работает следующим образом [9]. В исходном состоянии пружина 1 находится в сжатом состоянии. Датчик ДР измеряет расстояние до вкладыша, информация о котором поступает на передающую радиостанцию ПР. С передающей радиостанции ПР высокочастотный сигнал поступает по стволу на приёмную радиостанцию П и далее на блок приема информации ПИ.

При обрыве каната или застревании клетки при движении вниз по стволу приводная пружина 1 разжимается, коуш 2, центральная тяга 3 и переходная тяга 4 опускаются, в результате чего формируется сигнал о наклоне (напуске) каната. Срабатывает парашют 5, зажимая тормозные канаты 6 и 7. При этом опускается вкладыш 8, образуя зазор между ним и датчиком расстояния ДР. Последний определяет расстояние до вкладыша 8 и передаёт данные измерений через передающую ПР и приёмную П радиостанции в блок приема информации ПИ. При достижении критического значения расстояния между датчиком ДР и вкладышем 8 блоком приема информации ПИ формируется команда «Стоп» подъёмной машине ПМ.

Эффект от применения данного устройства заключается в обеспечении непрерывного контроля состояния парашюта и передаче информации в реальном времени о его срабатывании с последующим формированием команды «Стоп», передающейся подъёмной машине. Такое решение повышает безопасность работы подъёмной машины и исключает возможность напуска каната на подъёмный сосуд.

Датчики в составе комплекса КТС БПУ внедрены на ГП «Луганскуголь», ГП «Львовуголь», ПАО «Ровенькиантрацит», ПАО «Краснодонуголь» и ПАО «Свердловантрацит».

Выводы и направления дальнейших исследований. В работе решена научная задача по разработке методов и средств контроля зависания сосуда шахтной подъёмной установки.

Предложена математическая модель инерциального датчика наклона каната на основе микромеханических приборов. Выполнены экспериментальные исследования характеристик полученного устройства, выделены внешние возмущающие факторы. В результате получен оптимальным образом настроенный рекурсивный фильтр, обладающий необходимыми свойствами.

Предлагаемые технические решения позволяют повысить эффективность и безопасность эксплуатации ШПУ.

В дальнейшем необходимо исследовать ШПУ для получения функциональных зависимостей, связывающих параметры процессов с режимами работы установок.

Литература

1. Латыпов И.Н. Обоснование и обеспечение безопасной эксплуатации шахтных барабанных подъёмных установок: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.06 / Латыпов Иван Николаевич. – Екатеринбург, 2008. – 276 с.
2. Клыков Н.И. Защита подъёмных установок от напуска каната по положению сосудов в стволе [Электронный ресурс] / Н. И. Клыков, В. С. Удут // Известия Томского политехнического института. – Т. 158. – Томск, 1968.
3. Корняков М. В. Защита шахтных подъёмных установок от динамических нагрузок при движении подъёмного сосуда в стволе: монография / М.В.Корняков. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 164 с.
4. Грядущий Б.А. Комплекс технических средств для повышения безопасности эксплуатации подъёмных установок / Б.А.Грядущий, В.И.Мялковский, Н.А.Чехлатый // Уголь. – 2010. – №7. – С. 33.
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. – М.: Мир, 1988. – 168 с.
7. Пат. 91268 Україна, МПК⁷ В66В 5/14. Спосіб посадки-зняття підйомної судини з жорсткої підстави і пристрій для його здійснення / М.О. Чехлатий, В.І. Дворніков (Україна). – № а 2008 11420; заявл. 22.09.2008; опубл. 12.07.10. – Бюл. №13. – 6 с.
8. Пат. 97929 Україна, МПК В66С 13/04. Пристрій для виміру натягу та нахилу каната / М.О. Чехлатий, А.Ю. Грицаєнко, С.О. Євсюков, М.П. Демченко, О.А.Годар (Україна). – № а 2011 08953; заявл. 18.07.2011; опубл. 10.02.2012. – Бюл. №3. – 6 с.
9. Пат. 98912 Україна, МПК В66С 13/04. Пристрій для контролю спрацювання парашюта/М.О. Чехлатий, С.О. Євсюков, А.Ю. Грицаєнко К.А. Соломенцев, В.А. Пристром (Україна). – № а 2011 11690; заявл. 04.10.2011; опубл. 26.06.2012. – Бюл. №12. – 6 с.

*Статья рекомендована к публикации
канд. техн. наук Пристромом В.А.*