

Прецизионный инерциальный датчик угла наклона каната с фильтром Калмана

А. Ю. Грицаенко

Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела.

Донецкий национальный технический университет,
кафедра строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики.

E-mail: anthony.yuriev@ua.ru

Аннотация

Выполнен анализ характеристик инерциальных датчиков, изготовленных по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Обоснована пригодность недорогих акселерометров и гироскопов для использования в автоматизированных системах обеспечения безопасной эксплуатации шахтных подъёмных установок. Разработан математический аппарат и встроенное ПО, позволяющие в реальном времени с высокой точностью определять угол наклона в сложных динамических системах, таких как «подъёмный канат - сосуд - армировка шахтного ствола». Описан опыт эксплуатации разработанных датчиков наклона каната на шахтах Донбасса.

Введение

Наиболее часто аварийные ситуации в шахтном стволе происходят при застревании подъёмного сосуда (скип, клеть). Так, при застревании сосуда во время движения вниз и дальнейшем вращении канатопроводящего шкива происходит напуск каната на сосуд. Из-за большой массы каната, в некоторый момент происходит срывание сосуда, что зачастую приводит к обрыву каната или его деформации, а также к разрушению армировки ствола. Это вызывает не только простой оборудования во время ремонта, но и создаёт опасность гибели людей. Например, подобная авария произошла в 2012 году на шахте Южнодонецкая №1, где при падении в ствол скипа была разрушена армировка. Именно поэтому необходим непрерывный контроль напуска каната при движении сосуда в стволе, чтобы в момент его образования произвести своевременную остановку подъёмной машины.

Существует несколько способов контроля напуска каната: контроль по верхней части или контроль по всей длине [1]. В первом случае контролируется провисание струны каната (для подъёмных установок барабанного типа), а во втором – локальное провисание каната непосредственно над сосудом, т.е. измерение натяжения или угла наклона каната в пространстве.

Последний метод универсален и пригоден для подъёмных установок любого типа: как барабанных, так и многоканатных со шкивами трения. Датчики наклона каната крепятся непосредственно на канате выше подвешенного устройства, а передача информации на

поверхность в систему управления подъёмной машины осуществляется посредством радиоаппаратуры специального комплекта стволовой сигнализации и связи.

Цель данной работы – разработка математической модели инерциального датчика угла наклона каната, пригодного для эксплуатации в сложных условиях шахтного подъёма, а также его аппаратная и программная реализация на основе недорогого микроконтроллера.

Технология МЭМС и измерение угла наклона

Новой тенденцией в современной электронике является микросистемная техника, благодаря которой стало возможным создание миниатюрных инерциальных датчиков. МЭМС представляют собой совокупность классических электронных и механических элементов в микроисполнении.

Механические чувствительные элементы, построенные на вибрационных, ёмкостных, волновых или оптических принципах, преобразуют какое-либо воздействие на всю систему или отдельную её часть в электрический сигнал, который обрабатывает интегрированная электроника [2].

В недорогих МЭМС акселерометрах и гироскопах типовым элементом является балка и структуры на её основе в виде решёток монокристалла на подложке полупроводника. В общем случае это распределённая масса, позволяющая получать необходимый информационный сигнал ёмкостным, резонансным и другими методами (рис. 1).

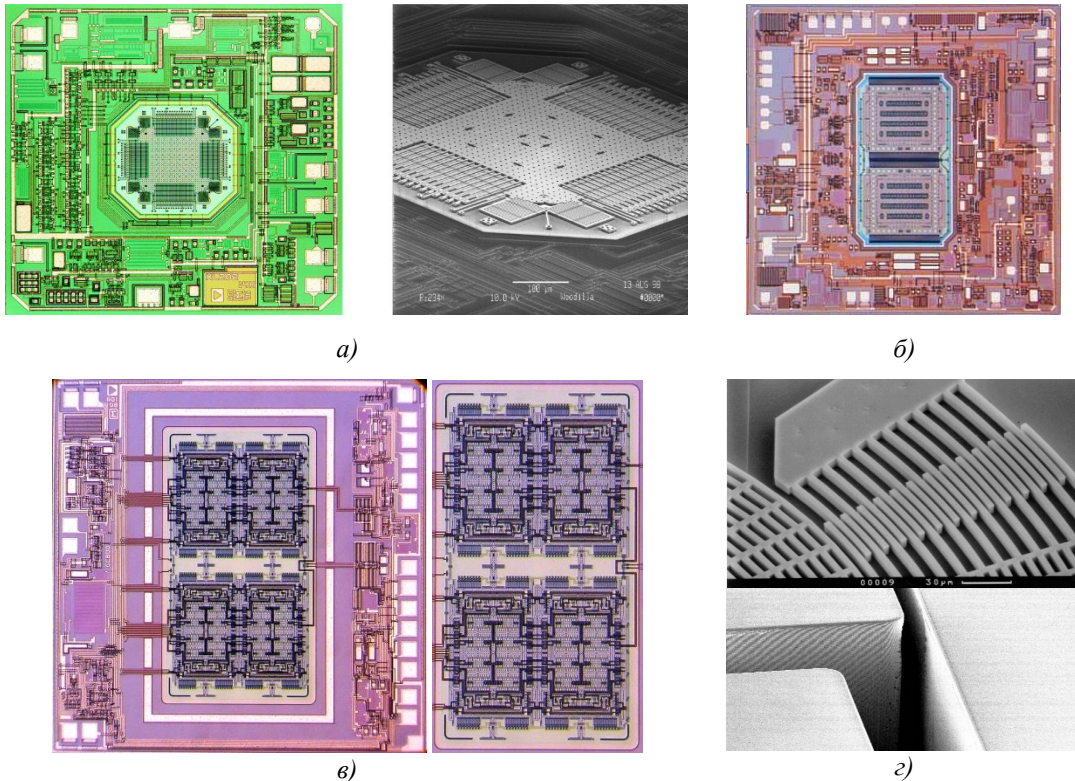


Рисунок 1 - Микроснимки МЭМС акселерометра ADXL203 (а), МЭМС гироскопов ADIS16100 (б) и ADXRS64x с разделёнными массами (в), масштабы типовых конструкции серийных вибрационных гироскопов (г)

Сигналы на выходе МЭМС акселерометра, находящегося в статическом состоянии, представляет собой проекции вектора силы тяжести на оси прибора. Но при движении подъёмного сосуда по рельсовым направляющим в стволе почти невозможно вычислить угол наклона каната лишь по данным акселерометра. Ввиду сложного характера динамики такого движения, в выходных сигналах датчика кроме реального и кажущегося ускорений всегда присутствует реакция на стохастические вибрации, резонансы и нестационарные колебания каната во всех плоскостях.

Поэтому для измерения угла наклона каната в движении помимо акселерометра нужно использовать не чувствительный к линейным ускорениям многоосевой МЭМС гироскоп, следуя принципам инерциальной навигации [3].

При этом главными источниками ошибок и шумов в данных МЭМС датчиков являются: ошибки смещений (постоянное смещение ноля, постоянная асимметрия ноля, случайная нестабильность ноля на длинной выборке), температурная нестабильность, случайное блуждание угла (гироскопы) и случайное блуждание скорости (акселерометры), ошибки квантования (для всех датчиков с цифровым выходом), дрейф угловой скорости (гироскопы) и чувствительность к синусоидальной вибрации.

Исходя из данных экспериментальных исследований, систематический дрейф МЭМС

гироскопов, пригодных для решения задач контроля напуска каната, не должен превышать $0,5-2^\circ/\text{час}$. В свою очередь подобный «уход» и другие параметры неидеального гироскопа компенсируются с помощью акселерометра. Важны также крутизна характеристики $\text{мВ}/^\circ/\text{сек}$, полоса пропускания гироскопа Гц, температурный дрейф $^\circ/\text{C}/\text{сек}$ и отношение сигнал/шум на выходе датчика. Способность к подавлению синусоидальных вибраций МЭМС гироскопов с физической точки зрения зависит от динамики самого чувствительного элемента. Например, на рис. 2, а показан циклический уход нуля не термостатированного гироскопа ADXRS453.

На рис. 2, б – реакция гироскопа серии CRG20 на вибрации в широком диапазоне частот. Учитывая сложные условия эксплуатации подъёмных установок и электронного оборудования из состава автоматизированных систем обеспечения безопасности, находящегося на подъёмном сосуде, перечисленные параметры являются основными при выборе гироскопов для построения датчика угла наклона каната.

В свою очередь к акселерометрам предъявляются не столь строгие требования. Так, рабочий диапазон линейных ускорений МЭМС акселерометров может быть в интервале $1-2g$, а возможные перегрузки при больших ускорениях компенсируются выносливостью прибора.

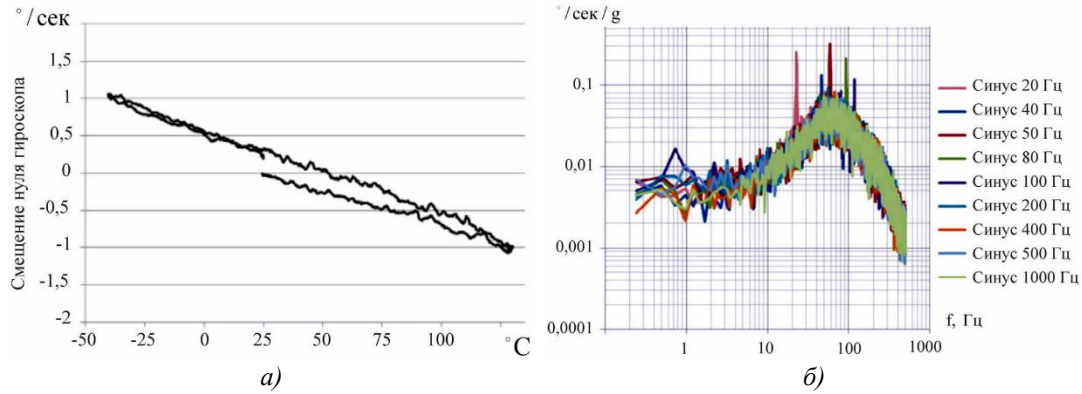


Рисунок 2 - Кривая температурного гистерезиса гироскопа ADXRS453 при некомпенсированном смещении нуля (а), реакция гироскопа CRG20 на асимметричные осям прибора вибрации (б)

Как правило, для МЭМС приборов с сосредоточенными параметрами допустимы перегрузки в 10000-30000g, т.е. они заведомо выдерживают падения и удары.

Устройство инерциального датчика наклона каната

Конструктивно датчик наклона каната выполняется в ударопрочном стальном корпусе. Крепления в виде хомутов обеспечивают его надёжную и долговременную фиксацию на канате. Внутри корпуса расположены электронные платы на резиновых демпферах для уменьшения вибраций в широком спектре частот. На плате располагаются микроконтроллер с необходимыми вычислительными возможностями, гироскоп и акселерометр, ориентированные специальным образом, усилители и АЦП, трансиверы цифровых и аналоговых интерфейсов.

Инерциальная часть датчика состоит из трёхосных гироскопа и акселерометра. Алгоритм определения угла наклона (АУН) строится на базе измерений акселерометра, измеряющего проекции кажущегося и реального ускорения на свои оси чувствительности, и гироскопа, измеряющего абсолютную угловую скорость. В основе АУН лежит интегрирование ускорений и угловых скоростей. В данном случае объект измерений – движущийся канат, а данные с датчиков интегрируются в проекциях на выбранную систему координат. Для текущей задачи подходит ортогональная локальная система координат с направленной по канату одной из осей (рис. 3а). На рис. 3б показан один из вариантов конструктивного исполнения платы датчиков наклона каната, разработанных автором и выпускающихся серийно. Датчики имеют точность 0,01° в статике и 0,03° в динамике.

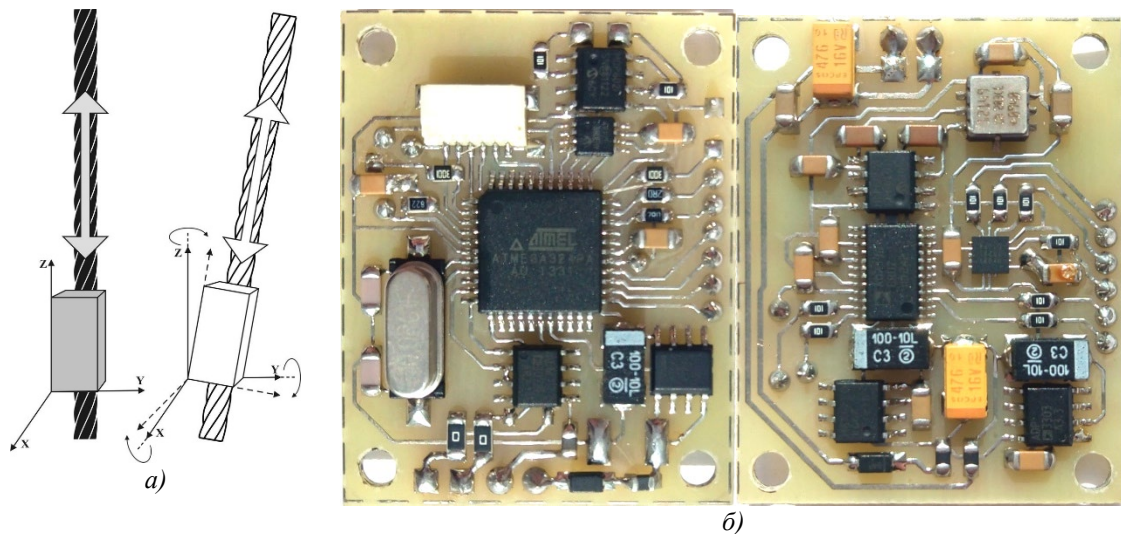


Рисунок 3 - Датчик угла наклона на канате в привязке к локальной системе координат (а) и конструктивное исполнение второго поколения платы датчика наклона каната на основе акселерометра ADXL203, гироскопа MAX21000 и микроконтроллера ATmega324PA (б)

Оси чувствительности акселерометра образуют с канатом связанную систему координат. Выходной сигнал по всем трём осям является проекцией кажущегося ускорения на оси локальной системы координат. Основная сложность в том, что измерения акселерометра одновременно содержат информацию об абсолютном и гравитационном ускорениях. Абсолютное ускорение содержит информацию о движении каната относительно земли и его собственном вращательном движении.

Таким образом, измерения акселерометра представляют собой аналоговый сигнал, нуждающийся в компенсации ошибок. В этой части модели компенсируется смещение нуля акселерометра, погрешность установки, а также неустойчивость масштабного коэффициента вследствие воздействия значительных линейных ускорений при движении сосуда, 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, погрешности первичных преобразователей, вызванные воздействием парциальных частот колебаний системы «подъёмный сосуд - канат») и шумов квантования АЦП. Инерциальные чувствительные элементы выдают информацию о приращении углов и угловых скоростей с частотой от 100 до 1000 Гц, чего достаточно для контроля аварийного напуска каната с быстродействием 10-50 миллисекунд.

Для выделения полезного сигнала МЭМС датчиков из аддитивной помехи (основой которой являются собственные частоты колебаний каната, удары и вибрации при движении сосуда) используется рекурсивная фильтрация [4,5]. Одним из подходов к данной задаче также является калмановская фильтрация. Имея модель системы и экспериментально определённые статистические свойства сигналов и помехи, можно построить оптимальную передаточную функцию фильтра [6], минимизировав среднеквадратичную ошибку определения угла. Для такого АУН не требуется больших вычислительных мощностей, достаточно микроконтроллера. А вычисление состояния системы в режиме реального времени – это обязательное требование для реализации аварийных защит. При этом неточно выбранные параметры математической модели компенсируются гибкостью алгоритма.

В общем случае модель данной линейной системы может быть представлена в пространстве состояний двумя уравнениями:

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

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 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 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:

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \omega_k dt, \quad (2)$$

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:

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \omega_k dt + \bar{\theta}_k, \quad (3)$$

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:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \begin{bmatrix} \theta_{k+1} \\ \omega_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} u_k + w_k, \\ y_{k+1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix} + z_k. \end{aligned} \quad (4)$$

Полученный АУН должен удовлетворять двум свойствам: а) среднееквадратичное значение ошибки алгоритма должно «совпадать» с ошибкой самой системы. Т.е. математическое ожидание оценки состояния должно мало отличаться от ожидаемого состояния самой системы; б) алгоритм должен обладать минимальной собственной ошибкой или вариацией.

Именно фильтр Калмана является идеальным средством оценки, удовлетворяющим двум свойствам выше. Но для использования калмановских алгоритмов нужно

наложить некоторые ограничения на характер относительно шума, воздействующего на систему. Из нашей 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). Вторым момент случайного процесса описывается в терминах ковариационной матрицы

$$\begin{aligned} S_w &= E(w_k w_k^T), \\ S_z &= E(z_k z_k^T), \end{aligned} \quad (5)$$

где S_w , S_z – ковариационные матрицы ошибки оценки вектора состояния;

z_k^T , w_k^T – транспонированные матрицы случайных шумов;

$E(\cdot)$ – ожидаемое среднееквадратичное значение ошибки.

Опуская интегрирование модельной динамической системы уравнений (1) для получения прогнозируемой оценки ковариационной матрицы ошибки, запишем непосредственно уравнения фильтра Калмана:

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

$$\hat{x}_{k+1} = (A\hat{x}_k + Bu_k) + K_k (y_{k+1} - C\hat{x}_k), \quad (b) \quad (6)$$

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

Где K_k – коэффициент усиления фильтра (или матрица коэффициентов обратной связи);

P_k – ковариация ошибки прогнозирования.

В уравнении 6, а с ростом шумов измерений растёт ковариационная матрица S_z , а значит 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 шумов S_z достоверность прогнозирования растёт.

Первое слагаемое в уравнении 6б повторяет модель линейной системы (1) при отсутствии средств измерения. Второе слагаемое

в бб называется коррекционным членом и показывает, насколько необходимо скорректировать прогнозируемое значение интересующей величины в соответствии с текущим измерением (действительным измерением тут нужно считать показания

акселерометра, содержащие данные о проекции на оси чувствительности гравитационного ускорения).

Структура программы микроконтроллера, построенной в соответствии с описанным алгоритмом, показана на рис. 4.

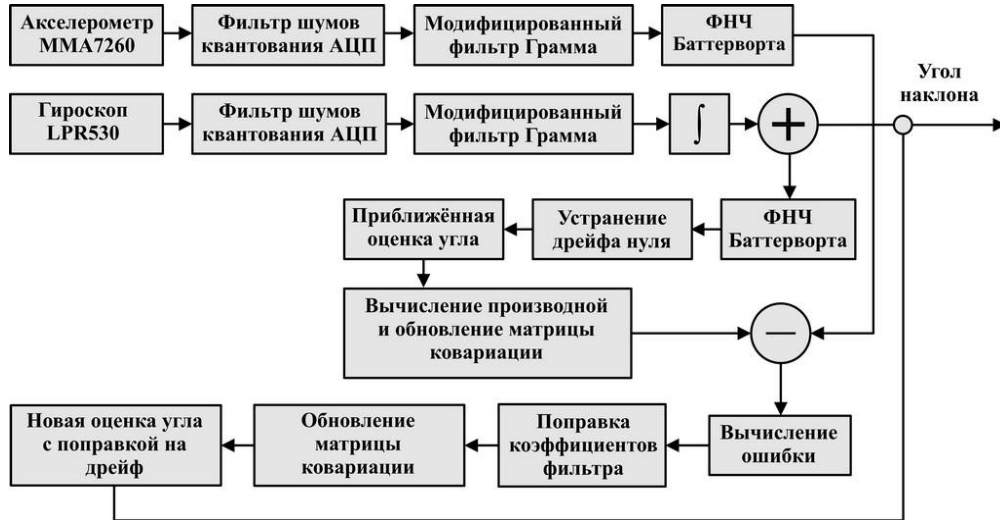


Рисунок 4 – Практическая реализация алгоритма вычисления угла наклона каната с использованием рекурсивного фильтра Калмана (в основе датчиков первого поколения)

Предварительная и промежуточная обработка сырых данных с МЭМС датчиков осуществляется посредством модифицированных фильтров низких частот [7, 8] с минимальным или отрицательным запаздыванием.

Для примера рассмотрим реализованный в алгоритме АУН рекурсивный фильтр Баттерворта 4го порядка. Фильтр построен в виде последовательного соединения секций фильтров второго порядка для ФНЧ.

При этом выходной сигнал фильтра второго порядка (одной секции) записывается как:

$$y(t_n) = (a_0 x(t_n) + a_1 x(t_{n-1}) + a_2 x(t_{n-2})) - (b_1 y(t_{n-1}) + b_2 y(t_{n-2})), \quad (7)$$

где a_0, a_1, a_2, b_1, b_2 - коэффициенты фильтра, которые рассчитываются для конкретной частоты дискретизации и частот $f_{\min}$ или $f_{\max}$;

$x(t_n)$ - точка данных временного ряда в момент времени t_n ;

$y(t_n)$ - посчитанное выходное значение секции.

Величина $y(t_n)$ является входной для следующей секции фильтра. При этом на каждой $n+1$ итерации алгоритма осуществляется формальная замена данных во временном ряду, так что $x(t_{n-2}) = x(t_{n-1})$, $x(t_{n-1}) = x(t_n)$, $x(t_n) = y(t_n)$. Коэффициент передачи каждой секции такого фильтра равен:

$$H(i\omega) = \frac{(a_0 + a_1 e^{-i\omega} + a_2 e^{-2i\omega})}{(b_0 + b_1 e^{-i\omega} + b_2 e^{-2i\omega})}, \quad (8)$$

где $\omega = \frac{2\pi f_0}{f_{\text{дискр}}}$ - угловая частота.

Общий коэффициент передачи вычисляется как произведение коэффициентов каждой секции. Для секций четвертого порядка индексы коэффициентов в формулах расширяются до четырех.

Моделирование и обсуждение результатов

На рис. 5 показаны результаты моделирования системы (4) с условиями Калмана (6) в среде Matlab для одной плоскости измерений.

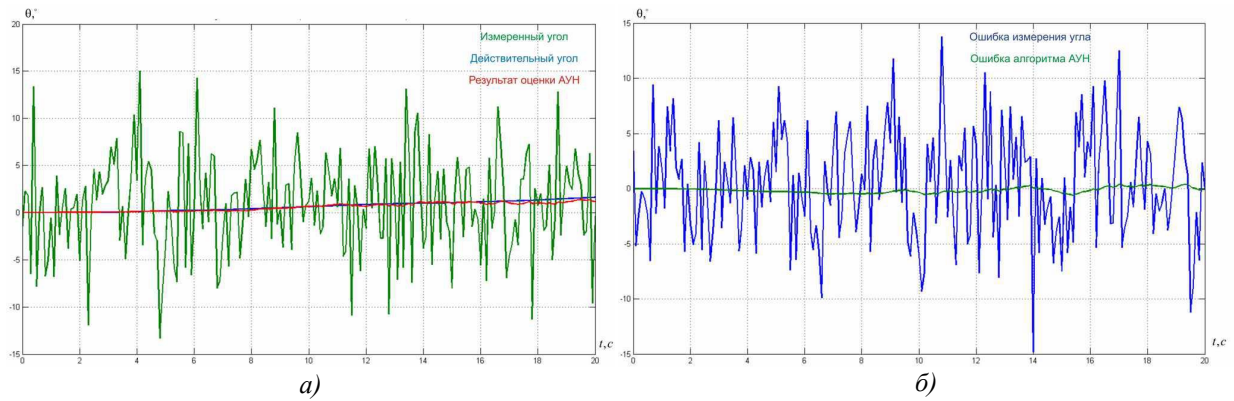


Рисунок 5 – Результаты моделирования АУН с фильтром Калмана в среде Matlab (а), сравнение абсолютной ошибки измерения угла с выходом фильтра (б) для одной плоскости измерений

В качестве ковариаций S_z, S_w брались квадраты скалярных значений соответствующих шумов s_z, s_w . Сама линейная система моделировалась на каждом шаге с помощью генератора случайных чисел. Из рисунков видно, что соответствующим образом настроенный фильтр обладает необходимыми свойствами подавления случайных выбросов в показаниях первичных датчиков. Получение абсолютной величины отклонений каната от вертикали в трёх измерениях не составляет затруднений.

Ниже показаны результаты экспериментальных исследований для датчиков первого поколения на основе гироскопа LPR530 и акселерометра MMA7260. На рис. 6, а показана зависимость увода ноля гироскопа от времени по одной из осей (сырые данные). На рис. 6, б – нормальная работа (после компенсации увода ноля) и нежелательная реакция этого же гироскопа на линейные ускорения до $3g$ и вибрации в диапазоне частот до 1 кГц на испытательном стенде.

На рис. 7, а показаны данные с гироскопа LPR530 с подобранными коэффициентами фильтров АУН. Частота среза первичной секции фильтров здесь 100 Гц в соответствии с необходимой характеристикой быстродействия датчика. По сравнению с рис. 6 видно, что правильный подбор коэффициентов фильтров АУН полностью восстановил сигналы угловых скоростей с гироскопа несмотря на шумы в высокочастотной области.

На рис. 8 приведены результаты измерения угла наклона каната при движении клетки в восточном воздухоподающем стволе шахты Должанская-Капитальная.

Разработанный датчик входил в комплекс технических средств обеспечения безопасности подъёмных установок (КТСБПУ) производства НИИГМ имени М.М. Фёдорова. Передача данных с датчика велась посредством аппаратуры ствовой связи СКРС-1Д. Программа датчика реализует описанный выше алгоритм АУН.

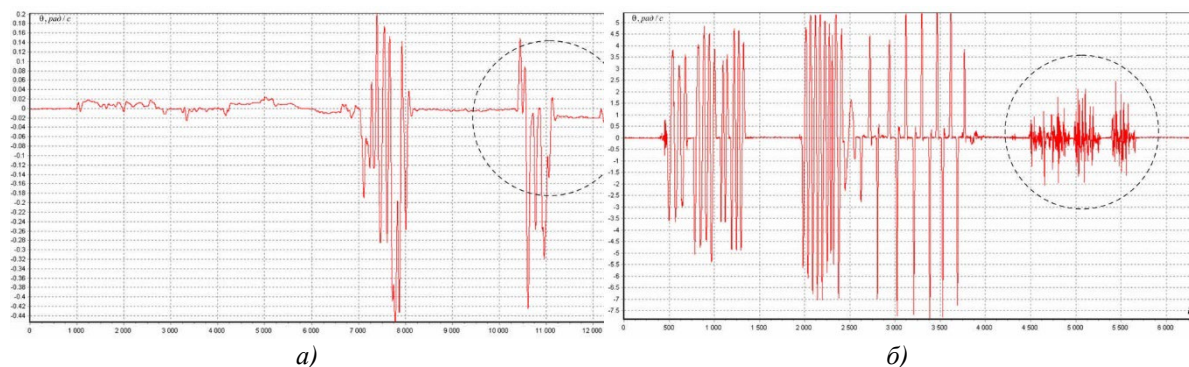


Рисунок 6 – Результаты экспериментальных исследований гироскопа LPR530 в составе датчика наклона каната без компенсации алгоритма АУН (а), то же, но компенсацией дрейфа и воздействием вибраций (б)

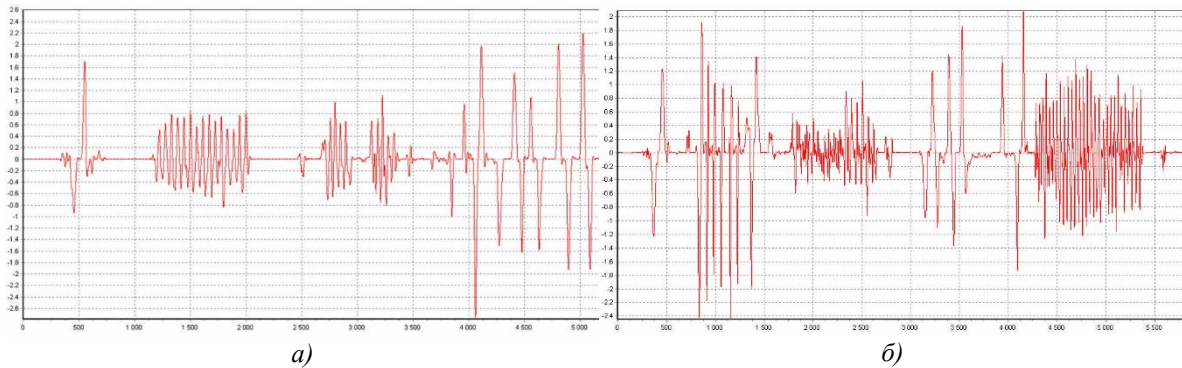


Рисунок 7 – Данные гироскопа LPR530 после подбора коэффициентов фильтра. Без воздействия вибраций (а) и с вибрациями на канате в широком диапазоне частот (б)

На рис. 8, а показано естественное среднеквадратичное отклонение угла наклона каната от вертикали непосредственно над клетью в процессе движения клетки вниз. Видно, что максимальная величина отклонения нормальной к канату плоскости X-Y от вертикали Z достигает 1 градуса.

На графике рис. 8, б показаны результаты измерения угла при посадке клетки на жёсткое основание. На графиках явно присутствует колебательный процесс, связанный с естественной динамикой продольных и поперечных колебаний в системе подъёмный сосуд - канат.

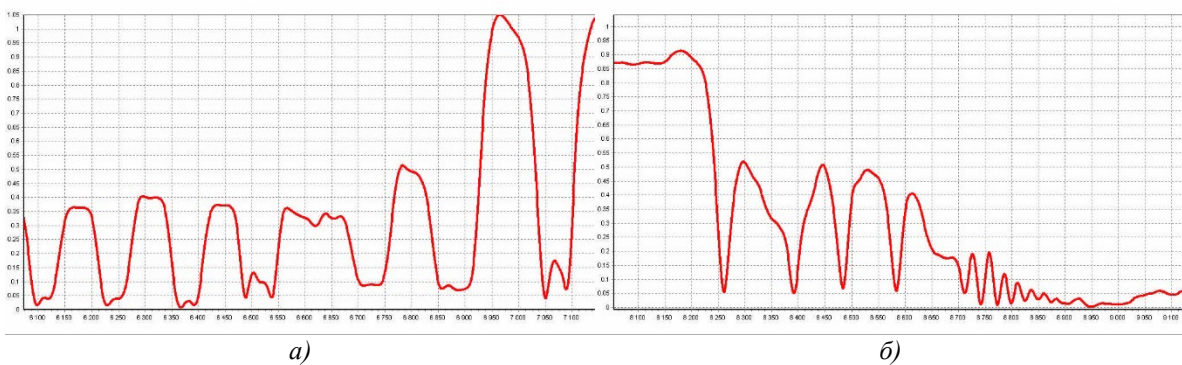


Рисунок 8 – Угол наклона каната, измеренный датчиком в процессе движения клетки вниз (а) и после посадки её на жёсткое основание (б)

Также видно, что после посадки клетки на жёсткое основание (в момент загрузки) колебания на канате затухают, что отражено на графике справа. Период этих колебаний также определяется динамикой и переходными характеристиками подъёмной установки.

При достижении углом наклона каната некоторого заданного порога (на практике это 3-5 градусов) датчик сигнализирует об аварии.

Связь с вышестоящими блоками автоматики организуется по интерфейсу RS485 или CAN в зависимости от модификации датчика.

Выводы

Эксплуатация разработанных автором датчиков наклона каната и их серийное производство ведётся НИИГМ имени М.М. Фёдорова с 2012 года. Опытные образцы датчиков наклона каната в составе КТСБПУ были испытаны на подъёмной установке восточного воздухоподающего ствола шахты «Должанская-Капитальная» ГП «Свердловантрацит».

Установочная серия поставлена на ОП «Шахта «Вергелевская» (4 комплекта) и ОП «Шахтоуправление «Луганское» (3 комплекта) ГП «Луганскуголь», ОП «Шахта «Белозерская» (3 комплекта) ГП «Добропольеуголь», ГП «Шахтоуправление «Южнодонбасское №1» (2 комплекта), ПАО «Краснодонуголь» (10 комплектов), ПАО «Павлоградуголь» (2 комплекта).

В составе комплексной системы автоматизации шахт УТАС разработки ГП «Машиностроительный завод «ИТРАС» (ранее «Петровский завод угольного машиностроения») данные датчики производились наряду с другим техническим оснащением подсистем КТСБПУ. Датчики показали свою надёжность, а разработанный алгоритм – устойчивость к широкому спектру возмущающих воздействий.

Литература

1. Шахтный подъем: научно-производственное издание / В. Р. Бежок, В. И. Дворников,

И. Г. Манец, В. А. Пристром; общ. Ред. Б. А. Грядущий, В. А. Корсун. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. – 624 с.

2. Нанотехнологии в электронике. Монография. / Под ред. Ю. А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – 448 с.

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

4. Хэмминг, Р. В. Цифровые фильтры: пер. с англ. / Под ред. А. М. Трахмана. – М.: Советское радио, 1980. – 224 с.

5. Васильев, В. П. Основы теории и расчёта цифровых фильтров: учебное пособие для высших учебных заведений / В. П. Васильев,

Э. Л. Муро, С. М. Смольский; под редакцией С. М. Смольского. – М.: Издательский центр "Академия", 2007. – 272 с.

6. Балакришнан, А. В. Теория фильтрации Калмана: перевод с английского – М.: Мир, 1988. – 168 с.

7. Айфичер, Э. Цифровая обработка сигналов, практический подход, 2-е издание. Пер. с англ. / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 992 с.

8. Гольдберг, Л. М. Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие для вузов / Л. М. Гольдберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – 2-изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.

Грицаенко А. Ю. Прецизионный датчик угла наклона каната с фильтром Калмана. Выполнен анализ характеристик инерциальных датчиков, изготовленных по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Обоснована пригодность недорогих акселерометров и гироскопов для использования в автоматизированных системах обеспечения безопасной эксплуатации шахтных подъёмных установок. Разработан математический аппарат и встроенное ПО, позволяющие в реальном времени с высокой точностью определять угол наклона в сложных динамических системах, таких как «подъёмный канат - сосуд - армировка шахтного ствола». Описан опыт эксплуатации разработанных датчиков наклона каната на шахтах Донбасса.

Ключевые слова: акселерометр, гироскоп, микроконтроллер, фильтр низкой частоты, фильтр Калмана, угол наклона каната, шахтная подъёмная установка, вибрации.

Gritsaenko A. Yu. Precision inclination angle sensor with Kalman filter for mine steel ropes. The article carried out an analysis of characteristics for inertial sensors manufactured with microelectromechanical systems (MEMS) technology. Substantiated suitability of inexpensive accelerometers and gyroscopes for use as part of automated equipment ensuring the safe operation of mine hoist systems. Also, mathematical apparatus and built-in software have been developed that make it possible to determine in real time the angle of inclination in complex dynamic systems, such as "lifting rope – vessel – mine shaft reinforcement" with high accuracy. The experience of operating the developed rope tilt sensors in Donbass mines is described.

Keywords: accelerometer, gyroscope, microcontroller, low-pass filter, Kalman filter, steel rope angle, mine hoist, vibrations.

Статья поступила в редакцию 15.04.2024
Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р.В.