

ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION  
TECHNOLOGIES  
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.873; 681.2.08

DOI: 10.17212/2782-2001-2026-1-31-46

## Измерение параметров угловых движений каната грузоподъемной машины\*

С.П. КРУГЛОВ<sup>1,a</sup>, С.В. КОВЫРШИН<sup>1,b</sup>, К.Ф. КОДЕНЁВ<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения

<sup>2</sup> 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>a</sup> [kruglov\\_s\\_p@mail.ru](mailto:kruglov_s_p@mail.ru) <sup>b</sup> [sergkow@mail.ru](mailto:sergkow@mail.ru) <sup>c</sup> [kirill\\_kodenev@mail.ru](mailto:kirill_kodenev@mail.ru)

На примере перемещения груза мостовым краном по одной горизонтальной оси рассматриваются вопросы измерения параметров угловых движений грузового каната грузоподъемных машин с подвешенным грузом для построения системы автоматического управления перемещением груза. В угловом движении грузового каната выделяют две составляющие. Первая относится к свободным маятниковым колебаниям груза, вызванным переходными процессами. Она необходима системе управления для формирования управляющих воздействий, направленных на гашение этих колебаний. Вторая составляющая определяется внешней силой, действующей на груз, например ветер. При постоянной внешней силе и отсутствии колебательных движений это приводит к аperiodическому отклонению грузового каната от вертикали. Необходимость информации об этой составляющей определяется требованием компенсации перемещения груза при его позиционировании относительно целевой точки доставки, а также вопросами безопасности. В качестве источников информации предлагается использовать микромеханический совмещенный датчик, включающий акселерометры и датчики угловой скорости и расположенный на грузовом канате около точки крепления последнего на подъемном механизме крана. Также используется информация о линейном ускорении тележки крана. Предложено в качестве такой информации использовать оценку указанной переменной, построенной на основе аperiodического звена. Для оценивания указанных составляющих углового движения грузового каната, а также его угловой скорости предлагается использовать комплементарный фильтр, или фильтр Калмана. Отличительным свойством такого решения от широко используемого метода расширенного фильтра Калмана является глобальная сходимость оценок. Это повышает практическую ценность предложенного подхода. Приведены примеры компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** подъемный кран, подвешенный груз, маятниковые колебания груза, гашение колебаний, отклонение груза из-за действия внешней силы, комплементарный фильтр, фильтр Калмана, сходимость оценок

---

\* Статья получена 22 июля 2025 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Для построения автоматических систем управления краном требуется информация о параметрах угловых движений каната с подвешенным грузом. К ним относятся углы отклонения каната от вертикали и их угловые скорости на свободных колебаниях груза при переходных процессах по двум взаимно перпендикулярным осям перемещения груза, связанным с системой координат крана. Переходные процессы возникают при изменении линейного ускорения перемещения груза и при действии внешней силы на груз. Эта информация необходима для автоматизации гашения колебаний. Также рассматриваются углы отклонения каната от вертикали из-за действия внешней силы на переносимый груз по двум взаимно перпендикулярным осям перемещения груза, (например, при ветре или действии центробежной силы при повороте башенного крана). Эти углы необходимы для реализации автоматической корректировки позиционирования груза, решения вопросов безопасности и др. Указанные вопросы автоматизации, как правило, отличаются друг от друга. Таким образом, помимо значений углов отклонения каната от вертикали необходима информация о причинах такого отклонения, чтобы организовать эффективное управление перемещением груза.

Известен подход для измерения углов наклона грузового каната с помощью цифровой видеокамеры, например, закрепленной к грузовой тележке мостового крана [1]. Недостатками подхода являются нарушения работоспособности оптической системы при наличии помех в ее рабочей зоне (веток деревьев, тумана, дождя, снегопада), засветка камеры от внешнего источника света, необходимость постоянного обслуживания оптики от запыления, инея, влаги, а также высокая чувствительность к воздействию вибраций машины на видеокамеру, приводящих к потере точности измерения.

Известны решения на основе механических измерений отклонения от вертикальной оси ветвей каната при сдвоенном полиспасте с помощью группы датчиков, например, закрепленных на блоке подъема груза [2]. Недостатком является сложность монтажа и обслуживания системы механических датчиков, а также отсутствие универсальности, поскольку может использоваться только для кранов со сдвоенным полиспастом. Близкое к этому решению имеется другое, построенное на тензометрических датчиках [3]. Оно имеет практически те же недостатки.

Известен метод измерения углового положения грузового каната с помощью датчика, закрепленного на грузовом канате и содержащего акселерометры [4]. Предлагается измерять угол отклонения грузового каната с помощью данных акселерометров. Как будет показано ниже, с помощью таких акселерометров можно измерить только установившиеся значения углов отклонений каната от вертикали из-за действия внешних сил либо этих углов каната при неподвижном грузоподъемном механизме крана. То есть метод не обладает универсальностью.

Широко используются методы измерения углового положения грузового каната с использованием данных с акселерометров и датчиков угловой скорости (гироскопов), размещенных на грузовом канате или захватном крюке, с обработкой данных на расширенном фильтре Калмана [5–10]. Однако нелинейная калмановская фильтрация обладает рядом недостатков, основным из кото-

рых является локальная область сходимости оценок искоемых переменных [11]. Это порождает сложности практической реализации при назначении начальных значений оценок, случаев сбоев алгоритма и т. п.

Общим недостатком перечисленных решений является то, что ни одно из них не формирует информацию о причине отклонения грузового каната от вертикали и не в состоянии разделить отклонения на две составляющие: от действия внешней силы и свободные колебательные движения подвеса груза для необходимости разной реакции системы управления на эти отклонения.

Настоящая работа посвящена формированию решения по измерению параметров углового движения грузового каната, нацеленного на устранение указанных недостатков с использованием микромеханического датчика, расположенного на грузовом канате около точки подвески последнего к подъемному механизму крана, содержащего акселерометры и гироскопы, с использованием линейной фильтрации: калмановской или комплементарной, с возможностью разделения углового движения грузового каната на указанные выше составляющие.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Без снижения общности рассуждений для класса грузоподъемных машин с подвешенным грузом рассмотрим движение тележки мостового крана при перемещении груза по одной оси (пренебрегаем массой каната и трением угловых движений). Кинематическая схема такой механической системы представлена на рис. 1.

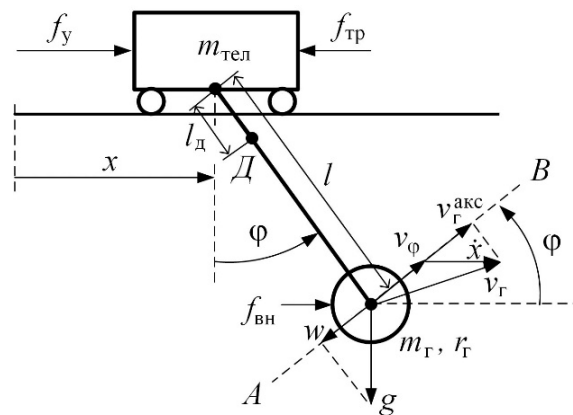


Рис. 1. Кинематическая схема перемещения груза по одной горизонтальной оси

Fig. 1. Kinematic diagram of cargo movement along one horizontal axis

На рисунке и в дальнейших рассуждениях используются следующие обозначения:  $m_{\text{тел}}$  – приведенная масса тележки (с учетом инерции вращающихся при движении ее колес);  $m_{\Gamma}$  – масса переносимого груза (считаем, что к ней относится и масса грузозахватного механизма);  $r_{\Gamma}$  – радиус инерции груза;

$x$  – линейное перемещение тележки;  $l$  – длина каната подвеса груза (грузового каната), т. е. расстояние от точки его крепления на тележке до центра масс груза;  $l_d$  – расстояние от точки крепления грузового каната на тележке до точки Д, расположенной на канате,  $l_d \leq l$ ;  $f_y$  – управляющая сила со стороны привода тележки крана;  $f_{тр}$  – сила трения, противодействующая линейному перемещению тележки крана;  $f_{вн}$  – сила внешнего воздействия на груз, приложенная к центру масс груза, например, из-за ветра;  $\varphi$  – угол отклонения каната подвеса груза относительно вертикальной оси;  $AB$  – ось чувствительности акселерометра, установленного в центре масс груза, перпендикулярная канату подвеса;  $v_\varphi = l\dot{\varphi}$  – составляющая линейной скорости груза, образованная угловым движением грузового каната;  $\dot{x}$  – вектор линейной скорости тележки;  $v_\Gamma$  – линейная скорость груза;  $v_\Gamma^{акс}$  – проекция линейной скорости груза на ось чувствительности акселерометра;  $g$  – ускорение свободного падения;  $w = g \sin \varphi$  – проекция ускорения свободного падения на ось чувствительности акселерометра, расположенного в центре масс груза.

Представленная механическая система является двухзвенной. Первое звено включает тележку крана с линейным перемещением ( $x$ ), на которую на основании теоремы Пуансо воздействует суммарная сила:  $f_\Sigma = f_y - f_{тр} + f_{вн}$ . Второе звено – подвес груза с угловым движением ( $\varphi$ ), на которое действует (также на основе теоремы Пуансо) внешний момент ( $l f_{вн} \cos \varphi$ ). Поэтому для описания динамики движения механической системы по рис. 1 можно воспользоваться известным уравнением Эйлера – Лагранжа для неконсервативных систем с учетом только внешних сил и моментов, которое здесь можно записать как

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = f_\Sigma; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = l f_{вн} \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $L = K - \Pi$ , здесь  $K$ ,  $\Pi$  – полная кинетическая и полная потенциальная энергия механической системы соответственно;  $t$  – текущее время.

По законам физики полная кинетическая энергия определяется как  $K = 0,5 \left( m_{тел} \dot{x}^2 + m_\Gamma v_\Gamma^2 + m_\Gamma r_\Gamma^2 \dot{\varphi}^2 \right)$ , где  $v_\Gamma^2 = (\dot{x} + l\dot{\varphi} \cos \varphi)^2 + (l\dot{\varphi} \sin \varphi)^2$ . Полная потенциальная энергия  $\Pi = g m_\Gamma l (1 - \cos \varphi)$ .

Большинству типовых режимов использования крана соответствует следующее соотношение:  $r_\Gamma^2 \ll l^2$ , или

$$r_\Gamma^2 / l^2 \approx 0. \quad (2)$$

Подстановка указанных уравнений в (1) дает решение относительно  $x = x(t)$ ,  $\varphi = \varphi(t)$  в виде следующей системы дифференциальных уравнений с приближительными соотношениями в силу (2):

$$\begin{cases} \ddot{x} \approx \gamma^{-1} \left[ \left( m_T l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi + f_{\Sigma} \right) - m_T \cos \varphi \left( a_T^{\text{BH}} - g \sin \varphi \right) \right]; \\ \ddot{\varphi} \approx (\gamma l)^{-1} \left[ -\cos \varphi \left( m_T l \dot{\varphi}^2 \sin \varphi + f_{\Sigma} \right) + (m_{\text{тел}} + m_T) \left( a_T^{\text{BH}} - g \sin \varphi \right) \right], \end{cases} \quad (3)$$

где  $\gamma \approx m_{\text{тел}} + m_T (\sin \varphi)^2$ ;  $a_T^{\text{BH}} = f_{\text{вн}} \cos \varphi / m_T$  – линейное ускорение груза, вызванное внешней силой.

Рассмотрим динамику колебательных движений подробнее в упрощенной постановке, считая, что диапазон углов  $\varphi$  небольшой (на практике не более 10 градусов):  $\sin \varphi \approx 0$ ,  $\cos \varphi \approx 1$ . Если выразить из первого уравнения системы (3) сигнал  $f_{\Sigma}$  и подставить результат во второе уравнение, то его можно описать в виде

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi \approx \left( a_T^{\text{BH}} - \ddot{x} \right) / l, \quad (4)$$

где  $\omega_0$  – собственная частота маятниковых колебаний, в силу (2) равная  $\omega_0 = \sqrt{gl / (l^2 + r_T^2)} \approx \sqrt{g/l}$ , что следует из уравнения свободных колебаний и выводов [12].

Левая часть дифференциального уравнения (4) описывает собственное колебательное движение каната с грузом, а правая часть – его возмущение, представляющее ускорение тележки и воздействие внешней силы. Предположим, что система управления краном нацелена на гашение собственных колебательных движений посредством формирования соответствующего ускорения тележки ( $\ddot{x}$ ), например, как это предполагалось в [12, 13]. Вынужденное отклонение грузового каната от вертикали объясняется действием внешней силы ( $f_{\text{вн}}$ ). Если предположить, что она постоянная, то такое отклонение будет иметь аperiodический характер. Цель системы управления краном – скомпенсировать положение груза из-за действия внешней силы при его позиционировании в целевой точке.

В силу указанных доводов разделим угол  $\varphi$  на две составляющие:

$$\varphi \stackrel{\Delta}{=} \varphi_{\text{кол}} + \varphi_{\text{ап}}, \quad (5)$$

где  $\varphi_{\text{кол}}$  – угол колебательного отклонения каната от вертикали или от значения угла  $\varphi_{\text{ап}}$ ;  $\varphi_{\text{ап}}$  – аperiodическая часть отклонения грузового каната от вертикали за счет действия внешней силы, причем если внешняя сила постоянна, то  $\varphi_{\text{ап}} \rightarrow \varphi_{\text{уст}}$  при  $t \rightarrow \infty$ ;  $\varphi_{\text{уст}}$  – установившееся значение угла  $\varphi$  из-за действия постоянной внешней силы при  $\varphi_{\text{кол}} \rightarrow 0$ .

Наиболее перспективными для измерения параметров угловых движений грузового каната являются совмещенные микромеханические датчики, вклю-

чающие акселерометры и датчики угловой скорости (гироскопы) с тремя осями чувствительности. Их отличает миниатюрность, малое потребление энергии, надежность, высокая точность (с учетом компенсации дрейфа гироскопов и смещения нуля акселерометров), фактическое отсутствие влияния внешних факторов, за исключением температуры, которая влияет на уровень указанного дрейфа гироскопов и смещения нуля акселерометров [14]. Однако имеются известные методы компенсации этих явлений в виде начальной выставки указанных датчиков с определением дрейфа гироскопа и смещения нуля акселерометра и соответствующей коррекцией текущих показаний. Для упрощения дальнейших рассуждений без снижения общности получаемых выводов примем, что этих явлений у датчиков нет.

Также следует отметить предпочтительное расположение такого датчика в точке Д грузового каната вблизи от точки его подвески к тележке крана. Это дает следующие преимущества: безопасная зона расположения датчика с отсутствием механических воздействий; несложный монтаж; возможность проводной передачи данных в систему управления краном, что снижает эксплуатационные затраты и др. [15].

Ставится задача: по показаниям совмещенного датчика, расположенного в точке Д грузового каната, включающего акселерометр и датчик угловой скорости (гироскоп), а также, возможно, по дополнительной информации об ускорении тележки крана определить текущее значение угла  $\varphi$  с выделением его составляющих  $\varphi_{\text{кол}}$ ,  $\varphi_{\text{ап}}$ . Первая составляющая нужна для реализации автоматического гашения маятниковых колебаний, вторая – для автоматической коррекции положения груза в горизонтальной плоскости. Оси чувствительности указанных датчиков располагаются перпендикулярно грузовому канату для определения соответствующих характеристик движения каната в плоскости своего движения.

## 2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Из (3) и рис.1 можно определить проекцию линейного ускорения груза на ось чувствительности акселерометра:

$$\begin{aligned} \dot{v}_Г^{\text{акс}} &= l\ddot{\varphi} + \ddot{x} \cos \varphi \approx \\ &\approx \frac{1}{\gamma} \left[ m_{\text{тел}} + m_Г - m_Г (\cos \varphi)^2 \right] \left( a_Г^{\text{вн}} - g \sin \varphi \right) = a_Г^{\text{вн}} - g \sin \varphi. \end{aligned} \quad (6)$$

Широко известно (см., например, [16]), что акселерометр, расположенный в центре масс груза с указанной осью чувствительности, формирует выходной сигнал  $(a_Г^{\text{акс}})$ , соответствующий кажущемуся ускорению, равному измеряемому ускорению  $(\dot{v}_Г^{\text{акс}})$ , за вычетом проекции на ось чувствительности акселерометра вектора ускорения свободного падения по рис. 1 ( $w = g \sin \varphi$ ), т. е.

$$a_Г^{\text{акс}} = \dot{v}_Г^{\text{акс}} + g \sin \varphi, \quad (7)$$

а с учетом (6)

$$a_{\Gamma}^{\text{акс}} \approx a_{\Gamma}^{\text{вн}}. \quad (8)$$

Отсюда можно сделать следующие выводы.

1. Рассматриваемый акселерометр измеряет только составляющую ускорения груза, обусловленную внешней силой, действующей на груз.

2. При отсутствии внешней силы при любых движениях механической системы по рис. 1 и действия любых сил  $f_y$ ,  $f_{\text{тр}}$  показания рассматриваемого акселерометра будут близкими к нулю:  $a_{\Gamma}^{\text{акс}} \cong 0$ . При этом указанный акселерометр нельзя использовать для измерения угла  $\varphi$  на свободных колебаниях при отсутствии внешней силы, а также использовать измерения составляющей  $\Phi_{\text{кол}}$ .

3. Угол  $\varphi$  может быть определен с помощью акселерометра, например, при отсутствии линейного ускорения груза:  $\dot{v}_{\Gamma}^{\text{акс}} \cong 0$ , когда из-за действия постоянной внешней силы, например ветра, появляется установившееся угловое состояние:  $\varphi \cong \varphi_{\text{уст}}$ , соответствующее  $\dot{\varphi} \cong 0$ . Поскольку по рис. 1  $\dot{v}_{\Gamma}^{\text{акс}} = \dot{v}_{\varphi} + \ddot{x}$ , указанное условие предполагает  $\ddot{x} \cong 0$ . Тогда на основании зависимости (7) для общего случая и в силу указанной ранее малости  $|\varphi|$  можно записать

$$\varphi_{\text{уст}} = \arcsin\left(a_{\Gamma}^{\text{акс}}/g\right) \approx f_{\text{вн}}/(m_{\Gamma}g) \text{ при } \varphi \cong \varphi_{\text{уст}}, \ddot{x} \cong 0, \quad (9)$$

где  $\varphi_{\text{уст}}$  – угол отклонения подвеса в установившемся состоянии, когда  $\varphi \cong \varphi_{\text{уст}}$ .

Не дожидаясь установившегося состояния ( $\varphi \neq \varphi_{\text{уст}}$ ,  $\ddot{x} \neq 0$ ), в силу (8) и (7) зависимость (9) будет формировать прогноз угла  $\varphi_{\text{уст}}$ , соответствующего условиям для (9):

$$\widehat{\varphi}_{\text{уст}} \stackrel{\varphi \neq \varphi_{\text{уст}}}{=} \arcsin\left(a_{\Gamma}^{\text{акс}}/g\right) \approx \varphi_{\text{уст}}, \quad (10)$$

где  $\widehat{\varphi}_{\text{уст}}$  – прогноз угла отклонения подвеса на будущем установившемся режиме как реакции на текущую внешнюю силу.

Из (5) оценку угла  $\varphi_{\text{ап}}$  (обозначим как  $\widehat{\varphi}_{\text{ап}}$ ) можно определить по соотношению

$$\widehat{\varphi}_{\text{ап}} = \widehat{\varphi}_{\text{уст}} / \left(\widehat{T}_{\text{ап}} p + 1\right), \quad (11)$$

где  $\widehat{T}_{\text{ап}}$  – оценка постоянной времени аperiодической составляющей углового движения грузового каната из-за действия внешней силы; исходя из характера рассматриваемого движения (время его реализации не менее четверти периода колебаний) и свойств аperiодического звена в качестве такой оценки можно

использовать значение  $\widehat{T}_{\text{ан}} \gg T_0 / 12$  с ограничением сверху по требованиям к технологическому процессу;  $T_0 = 2\pi / \omega_0$  – период маятниковых колебаний;  $p = d / dt$  – оператор дифференцирования.

Полный угол отклонения грузового каната от вертикали может быть определен только на основании показаний датчика угловой скорости:

$$\varphi = \int_t \omega_{\text{дус}}(t) dt + \varphi_0, \quad (12)$$

где  $\omega_{\text{дус}}$  – показания датчика угловой скорости (как указывалось выше, считаем, что дрейфа этого датчика нет или он скомпенсирован);  $\varphi_0$  – начальное значение угла.

Теперь рассмотрим аналогичный акселерометр, но расположенный выше переносимого груза в точке Д грузового каната (см. рис. 1) с аналогичной осью чувствительности. При этом считаем массу акселерометра ничтожно малой. По уравнению (6) и по аналогии с ним можно записать следующие уравнения:

$$\dot{v}_\Gamma^{\text{акс}} = l\ddot{\varphi} + \ddot{x} \cos \varphi; \quad \dot{v}_\text{Д}^{\text{акс}} = l_\text{Д}\ddot{\varphi} + \ddot{x} \cos \varphi, \quad (13)$$

где  $\dot{v}_\text{Д}^{\text{акс}}$  – проекция линейного ускорения датчика на ось чувствительности, перпендикулярной грузовому канату.

Выразим вначале из первого уравнения (13) сигнал  $\ddot{x} \cos \varphi$  и подставим результат во второе, используя также значение  $\dot{v}_\Gamma^{\text{акс}}$  из (6). Аналогичные действия произведем относительно сигнала  $\ddot{\varphi}$ , в результате найдем

$$\dot{v}_\text{Д}^{\text{акс}} = a_\Gamma^{\text{ВН}} - g \sin \varphi - (l - l_\text{Д})\ddot{\varphi} = \frac{l_\text{Д}}{l} \left( a_\Gamma^{\text{ВН}} - g \sin \varphi \right) + \frac{l - l_\text{Д}}{l} \ddot{x} \cos \varphi.$$

Следовательно, по аналогичным рассуждениям, используемым при выводе (8), с учетом второго равенства из (13) запишем

$$\begin{aligned} a_\text{Д}^{\text{акс}} &= a_\Gamma^{\text{ВН}} - (l - l_\text{Д})\ddot{\varphi} = k_l a_\Gamma^{\text{ВН}} + (1 - k_l)(\ddot{x} \cos \varphi + g \sin \varphi) = \\ &= \ddot{x} \cos \varphi + g \sin \varphi + l_\text{Д}\ddot{\varphi}, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $k_l = l_\text{Д} / l$ .

Отсюда следует, что при  $l_\text{Д} \ll l$ , или  $k_l \approx 0$ , уравнение (14) можно переписать в виде  $a_\text{Д}^{\text{акс}} \approx a_\Gamma^{\text{ВН}} - l\ddot{\varphi} = \ddot{x} \cos \varphi + g \sin \varphi$ . Следовательно показания акселерометра в точке Д при наличии информации об ускорении тележки ( $\ddot{x}$ ) по аналогии с (9) и (10), с использованием последнего равенства можно получить следующие зависимости для определения  $\varphi$ ,  $\varphi_{\text{уст}}$ ,  $\widehat{\varphi}_{\text{уст}}$  (также с учетом малости  $\varphi$ ):

$$\varphi \approx \arcsin \left[ \left( a_\text{Д}^{\text{акс}} - \ddot{x} \right) / g \right] \approx \left( a_\text{Д}^{\text{акс}} - \ddot{x} \right) / g; \quad (15)$$

$$\begin{cases} \varphi_{уст} \approx a_{д}^{акс} / g & \text{при } \varphi \equiv \varphi_{уст} = \text{const}, \ddot{x} \equiv 0; \\ \hat{\varphi}_{уст} \approx a_{д}^{акс} / g & \text{при } \ddot{\varphi} \approx 0, \varphi \neq \varphi_{уст}. \end{cases} \quad (16)$$

Таким образом, угол отклонения грузового каната от вертикали может быть определен по показаниям акселерометра в точке Д грузового каната при неизвестной величине  $a_{г}^{вн}$  только при  $l_{д} \ll l$  и на основе информации о линейном ускорении тележки крана либо при отсутствии последнего ( $\ddot{x} \equiv 0$ ), например, при неподвижной тележке крана. То есть информация только от указанного акселерометра в общем случае не может использоваться для определения текущего значения угла  $\varphi$ , что предлагалось в [4].

Из полученной по (16) величины  $\hat{\varphi}_{уст}$  находится оценка аperiodической составляющей углового движения ( $\hat{\varphi}_{ап}$ ) на основании (11). Оценка колебательной составляющей углового движения по (5) определяется по зависимости

$$\hat{\varphi}_{кол} = \varphi - \hat{\varphi}_{ап}, \quad (17)$$

где  $\varphi$  определяется по (15).

Следует отметить, что для использования зависимости (15) необходимо знать текущее ускорение тележки крана ( $\ddot{x}$ ). Для исключения дополнительного датчика акселерометра можно использовать оценку этого сигнала на основе простейшей аperiodической модели привода тележки крана, что соответствует предложению, например, в [9]. Современные краны оборудуются асинхронными сервоприводами с частотными преобразователями и векторным управлением. Скорость отработки заданной частоты (скорости перемещения тележки) очень высокая – сотые доли секунды [17, 18]. В связи с этим динамику разгона можно смоделировать аperiodическим звеном:

$$T_{пр} \ddot{\hat{x}} + \dot{\hat{x}} = \dot{x}_{зад},$$

где  $T_{пр}$  – постоянная времени привода, приблизительно известна по паспортным данным привода;  $\hat{\dot{x}}$ ,  $\hat{\ddot{x}}$  – оценки скорости и ускорения тележки;  $\dot{x}_{зад}$  – заданная скорость тележки, формируемая системой управления краном. Отсюда

$$\hat{\ddot{x}} = (\dot{x}_{зад} - \hat{\dot{x}}) / T_{пр}. \quad (18)$$

Можно показать, что указанные выводы для датчика, расположенного в точке Д грузового каната, справедливы для любого крана с подвешенным грузом.

### 3. ПРИМЕР

Рассмотрим схему на рис. 1 с параметрами:  $m_{\text{тел}} = 2000$  кг,  $m_{\Gamma} = 1000$  кг,  $r_{\Gamma} = 0,5$  м,  $l = 8$  м,  $l_{\text{д}} = 0,7$  м,  $\varphi_0 = 0$ . Этой схеме соответствуют значения  $\omega_0 \approx 1,1 \text{ с}^{-1}$ ,  $T_0 \approx 5,7$  с. Примем  $\hat{T}_{\text{ап}} = 2,5$  с.

Моделирование крановой установки в соответствии с зависимостями (3) проводилось в компьютерной среде Matlab/Simulink/Multibody.

На рис. 2 представлены результаты моделирования при расположении совмещенного датчика в точке Д грузового каната при перемещении тележки с известным ускорением.

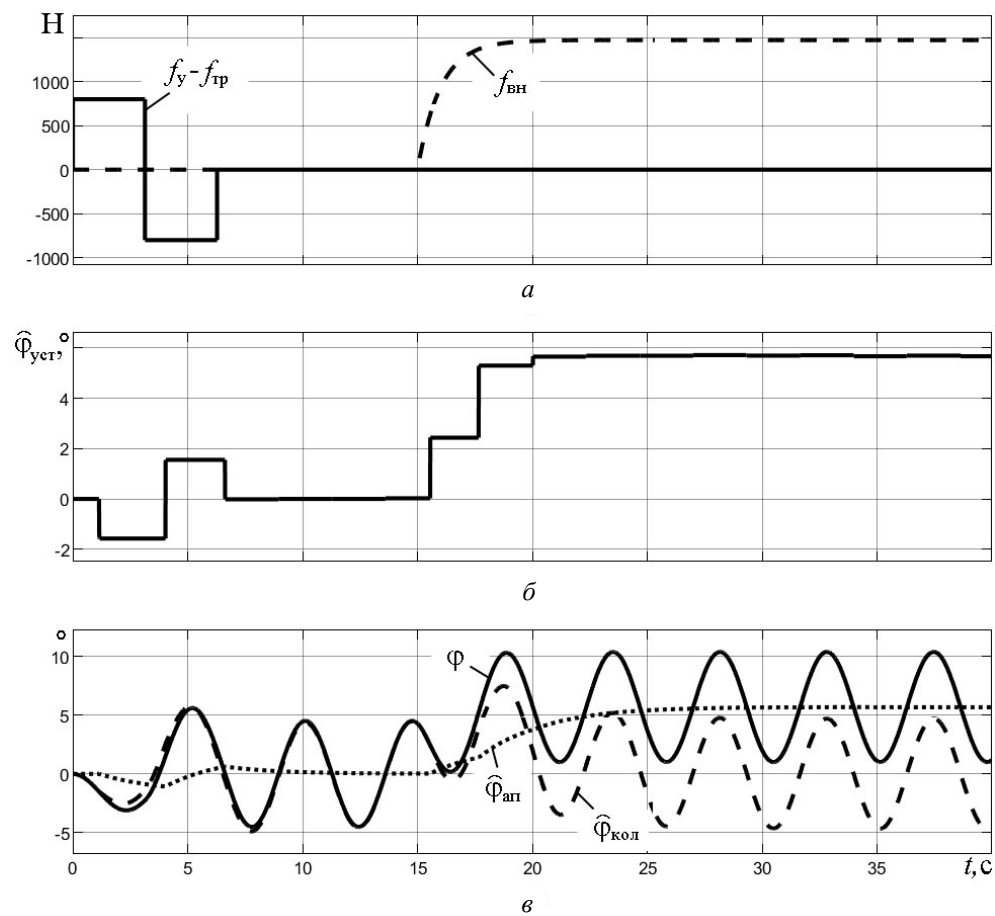


Рис. 2. Результаты определения параметров угловых движений грузового каната с использованием внешней для совмещенного датчика информации об ускорении тележки крана

Fig. 2. Results of determining the parameters of angular movements of the cargo rope using external information about the acceleration of the crane trolley for the combined sensor

На рис. 2, а указаны силы, действующие на крановую установку, на рис. 2, б – прогноз установившегося значения угла отклонения каната

от вертикали из-за внешней силы, на рис. 2,  $\varphi$  – угол отклонения грузового каната от вертикали и оценки его составляющих  $\Phi_{\text{кол}}$  и  $\Phi_{\text{ап}}$ , вычисленные по показаниям акселерометра и датчика угловой скорости (считаем, что они измеряют данные абсолютно точно) по зависимостям (11), (15), (16), (17).

Представленные исследования подтверждают полученные выше выводы по получению составляющих углового движения, принятых в (5), с помощью совмещенного датчика, установленного в точке Д грузового каната. Аналогичные результаты были получены и при других параметрах крановой установки.

На рис. 3 представлены результаты исследования при расположении совмещенного датчика в точке Д грузового каната при неподвижном положении тележки. Это также соответствует этапу позиционирования груза в конце его перемещения. Начальное значение угла  $\varphi$  равно  $5^\circ$ , действие ветра соответствует предыдущему исследованию. Для вычисления параметров углового движения использовались зависимости (11), (12), (16), (17), т. е. без использования внешней информации для совмещенного датчика. Структура рисунка та же, что и у рис. 2.

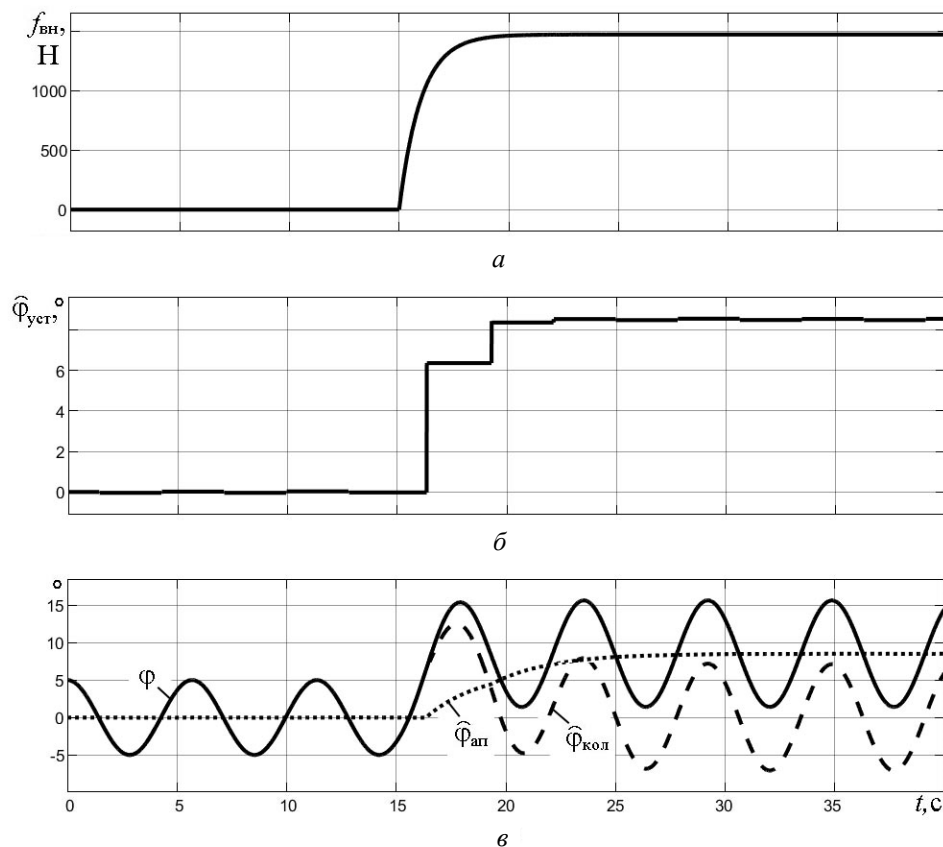


Рис. 3. Результаты определения параметров угловых движений грузового каната только по данным совмещенного датчика информации

Fig. 3. Results of determination of parameters of cargo rope angular movements only by data of combined information sensor

Исследования показывают эффективность определения составляющих углового движения по описанным выше зависимостям.

Исследованиями также были подтверждены зависимости (8) и (10) при расположении датчика в центре груза.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из изложенного выше следует, что показания акселерометра, расположенного в центре масс груза с осью чувствительности, перпендикулярной грузовому канату, можно использовать только для определения установившихся значений углов отклонения каната подвеса при воздействии внешней силы и их прогноза. Если акселерометр расположен на канате вблизи крепления последнего к тележке крана, так что  $l_d \ll l$ , акселерометр с учетом информации об ускорении тележки может использоваться для указанных измерений, а также для определения полного угла отклонений каната от вертикали и угла колебательных движений. Это выполняется на основе соотношений (15) – (18). То есть этот вариант более универсальный, позволяет определять параметры угловых движений грузового каната с указанием их причины: из-за свободных колебаний и действия внешней силы. Также этот вариант расположения датчика более эффективен для практики.

Для получения сигналов об угловой скорости предлагается использовать датчик угловой скорости (гироскоп), расположенный вместе с акселерометром (совмещенный датчик), с осью чувствительности, соответствующей движению груза в горизонтальной плоскости. По сигналам гироскопа на основе (12) определяются полные углы отклонения каната. Результирующие сигналы  $\varphi$ , полученные по (15) на основе данных акселерометра и по (12) – по данным гироскопа, можно использовать для повышения точности измерений углов посредством известного комплексирования сигналов с акселерометров и гироскопов, например, посредством комплементарных фильтров (реальные датчики имеют помехи в разных частотных областях) или фильтра Калмана. Данные виды фильтрации относятся к линейным с глобальной сходимостью оценок, в отличие от расширенного фильтра Калмана. Предлагается использовать микромеханические акселерометры и датчики угловой скорости, что соответствует современной элементной базе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 165672 U1 Российская Федерация. Устройство для измерения углов наклона грузового каната мостового крана относительно гравитационной вертикали: № 2016110262/11: заявл. 21.03.2016: опубл. 27.10.2016, Бюл. № 30 / Щербаков В.С., Корьтов М.С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)».
2. Патент № 2431596 C1 Российская Федерация. Устройство для измерения угла наклона канатов при двоярном полиспасте: № 2010110938/11: заявл. 23.03.2010: опубл. 20.10.2011, Бюл. № 29 / Твердохлебов Н.Ф., Кравченко О.А.
3. Патент № 197689 U1 Российская Федерация. Устройство мониторинга положений канатов грузовой тележки башенного крана: № 2019134314: заявл. 26.10.2019: опубл. 21.05.2020, Бюл. № 15 / Боушев В.Ю.

4. Патент № 2346879 С2 Российская Федерация. Устройство для измерения угла наклона каната грузоподъемной машины (варианты): № 2007102553/11: заявл. 23.01.2007: опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5 / Коровин В.А., Коровин К.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное объединение «Резонанс».
5. A load position observer for cranes with gyroscope measurements / U. Schaper, C. Sagert, O. Sawodny, K. Schneider // IFAC Proceedings. – 2001. – Vol. 44 (1). – P. 3563–3568. – DOI: 10.3182/20110828-6-it-1002.01456.
6. Kalmari J., Hyyti H., Visala A. Sway estimation using inertial measurement units for cranes with a rotating tool // IFAC Proceedings. – 2013. – Vol. 46 (10). – P. 274–279. – DOI: 10.3182/20130626-3-AU-2035.00050.
7. Патент № 2676210 С1 Российская Федерация. Устройство и способ управления раскачиванием груза, подвешенного на подъемном устройстве: № 2016125496: заявл. 06.11.2014: опубл. 26.12.2018, Бюл. № 36 / Саварежи С.М., Винати Ф., Винати С., Винати Ф., Винати М., Винати М., Винати Д.; заявитель и патентообладатель Винати С.Р.Л.
8. Rauscher F., Nann S., Sawodny O. Motion control of an overhead crane using a wireless hook mounted IMU // 2018 Annual American Control Conference (ACC). – Milwaukee, WI, USA, 2018. – P. 5677–5682. – DOI: 10.23919/ACC.2018.8431170.
9. Helma V., Goubej M., Šetka V. Inertial measurements processing for sway angle estimation in overhead crane control applications // 2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). – Delft, Netherlands, 2021. – P. 618–623. – DOI: 10.1109/AIM46487.2021.9517390.
10. Helma V., Goubej M. Active anti-sway crane control using partial state feedback from inertial sensor // 2021 23rd International Conference on Process Control (PC). – Strbske Pleso, Slovakia, 2021. – P. 137–142. – DOI: 10.1109/PC52310.2021.9447485.
11. Krener J. The convergence of the extended Kalman filter // Directions in mathematical systems theory and optimization. – Springer, 2003. – P. 173–182.
12. Круглов С.П., Ковыришин С.В. Идентификационное скоростное управление мостовым краном с сокращенной моделью переноса груза // Проблемы управления. – 2023. – № 4. – С. 28–37. – DOI: 10.25728/ru.2023.4.3.
13. Круглов С.П., Аксаментов Д.Н. Адаптивное управление мостовым краном по скорости перемещения тележки // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 86–92. – DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-86-92.
14. Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике / В.А. Жмудь, К.А. Кузнецов, Н.О. Кондратьев, В.Г. Трубин, М.В. Трубин // Автоматика и программная инженерия. – 2018. – № 3 (25). – С. 9–22.
15. Круглов С.П., Ковыришин С.В., Буторин Д.В. Способ идентификационного управления мостовым краном с новым расположением совмещенного датчика линейного ускорения и угловой скорости // Проблемы управления. – 2024. – № 4. – С. 61–73. – DOI: 10.25728/ru.2024.4.5.
16. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
17. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие. – СПб.: Корона Принт, 2010. – 320 с.
18. ООО «Зетек технологии»: сайт. – URL: [https://www.servosystem.ru/catalog/servotekhnika\\_i\\_servoprivod/](https://www.servosystem.ru/catalog/servotekhnika_i_servoprivod/) (дата обращения: 05.02.2026).

*Круглов Сергей Петрович*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» Иркутского государственного университета путей сообщения. Основное направление научных исследований – автоматизация технологических процессов, мехатроника, адаптивное управление в условиях текущей параметрической неопределенности. Имеет более 200 печатных работ. E-mail: [kruglov\\_s\\_p@mail.ru](mailto:kruglov_s_p@mail.ru)

*Ковыришин Сергей Владимирович*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» Иркутского государственного

университета путей сообщения. Основное направление научных исследований – автоматизация технологических процессов, мехатроника. Имеет около 50 печатных работ. E-mail: sergkow@mail.ru

*Коденёв Кирилл Фёдорович*, магистрант Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, направление «Мехатроника и робототехника». Основное направление научных исследований – автоматизация технологических процессов. Имеет 4 печатные работы. E-mail: kirill\_kodenev@mail.ru

*Kruglov Sergey P.*, D. Sc. (Eng.), Professor, Professor at the Production Process Automation Department, Irkutsk State Transport University. The main field of his scientific research is automation of technological processes, mechatronics, adaptive control in conditions of current parametric uncertainty. He has over 200 publications. E-mail: kruglov\_s\_p@mail.ru.

*Kovyrshin Sergey V.*, PhD (Eng.), associate professor at the Production Process Automation Department, Irkutsk State Transport University. The main field of his scientific research is automation of technological processes and mechatronics. He has about 50 publications. E-mail: sergkow@mail.ru.

*Kodenyov Kirill F.*, Master's student, School of Engineering of Information Technologies and Robotics, program "Mechatronics and Robotics". National Research Tomsk Polytechnic University. The main field of his scientific research is automation of technological processes. He has 4 publications. E-mail: kirill\_kodenev@mail.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2026-1-31-46

### ***Measurement of angular movement parameters of the hoisting machine rope\****

*S.P. KRUGLOV<sup>1,a</sup>, S.V. KOVYRSHIN<sup>1,b</sup>, K.F. KODENYOV<sup>2,c</sup>*

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, 15 Chernyshevsky Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>a</sup> kruglov\_s\_p@mail.ru   <sup>b</sup> sergkow@mail.ru   <sup>c</sup> kirill\_kodenev@mail.ru

#### **Abstract**

The issues of measuring the parameters of angular movements of a cargo rope of load-lifting machines with a suspended load for building a system for automatic control of cargo movement are considered on the example of cargo movement by a bridge crane along one horizontal axis. Two components are distinguished in the angular movement of the cargo rope. The first refers to the free pendulum oscillations of the load caused by transients. It is necessary for the control system to generate control actions aimed at quenching these oscillations. The second component is determined by the external force acting on the load, for example, the wind. With a constant external force and no oscillatory movements, this leads to an aperiodic deviation of the cargo rope from the vertical. The need for information about this component is determined by the need to compensate for the movement of the cargo when it is positioned relative to the target delivery point, as well as safety issues. As information sources it is suggested to use micro-mechanical combined sensor, including accelerometers and sensors of angular speed, located on the cargo rope near the point of fixation of the latter on the crane lifting mechanism. Information on the linear acceleration of the crane trolley is also used. It is proposed to use as such

---

\* Received 22 July 2025.

information an estimate of the specified variable built on the basis of an aperiodic link. It is proposed to use a complementary filter or the Kalman filter to estimate the specified components of the angular motion of the cargo rope, as well as its angular velocity. A distinctive property of such a solution from the widely used extended Kalman filter method is the global convergence of estimates. This adds practical value to the proposed approach. Examples of computer simulations are also given.

**Keywords:** crane, suspended load, pendulum load oscillations, oscillation damping, load deflection due to external force, complementary filter, Kalman filter, convergence of estimates

## REFERENCES

1. Shherbakov V.S., Korytov M.S. *Ustroistvo dlya izmereniya uglov naklona gruzovogo kanata mostovogo krana otnositel'no gravitatsionnoi vertikali* [Device for measuring angle of the cargo rope of the bridge crane regarding the gravity vertical]. Patent RF, no. 165672 U1, 2016.
2. Tverdoxlebov N.F., Kravchenko O.A. *Ustroistvo dlya izmereniya ugla naklona kanatov pri sdvoennom polispaste* [Device for measuring the angle of inclination of ropes in case of double polypast]. Patent RF, no. 2431596 C1, 2010.
3. Boushev V.Yu. *Ustroistvo monitoringa polozhenii kanatov gruzovoi telezhki bashennogo krana* [Tower crane truck rope position monitoring device]. Patent RF, no. 197689 U1, 2019.
4. Korovin V.A., Korovin K.V. *Ustroistvo dlya izmereniya ugla naklona kanata gruzopod"emnoi mashiny (varianty)* [Device for measuring the angle of inclination of the rope of a lifting machine (versions)]. Patent RF, no. 2346879 C2, 2009.
5. Schaper U., Sagert C., Sawodny O., Schneider K. A load position observer for cranes with gyroscope measurements. *IFAC Proceedings*, 2001, vol. 44 (1), pp. 3563–3568. DOI: 10.3182/20110828-6-it-1002.01456.
6. Kalmari J., Hyyti H., Visala A. Sway estimation using inertial measurement units for cranes with a rotating tool. *IFAC Proceedings*, 2013, vol. 46 (10), pp. 274–279. DOI: 10.3182/20130626-3-AU-2035.00050.
7. Savarezi S.M., Vinati F., Vinati S., Vinati F., Vinati M., Vinati M., Vinati D. *Ustroistvo i sposob upravleniya raskachivaniem gruza, podveshennogo na pod"emnom ustroistve* [Device and method of controlling swinging of load suspended from lifting apparatus]. Patent RF, no. 2676210 C1, 2018.
8. Rauscher F., Nann S., Sawodny O. Motion control of an overhead crane using a wireless hook mounted IMU. *2018 Annual American Control Conference (ACC)*, Milwaukee, WI, USA, 2018, pp. 5677–5682. DOI: 10.23919/ACC.2018.8431170.
9. Helma V., Goubej M., Šetka V. Inertial measurements processing for sway angle estimation in overhead crane control applications. *2021 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Delft, Netherlands, 2021, pp. 618–623. DOI: 10.1109/AIM46487.2021.9517390.
10. Helma V., Goubej M. Active anti-sway crane control using partial state feedback from inertial sensor. *2021 23rd International Conference on Process Control (PC)*, Strbske Pleso, Slovakia, 2021, pp. 137–142. DOI: 10.1109/PC52310.2021.9447485.
11. Krener J. The convergence of the extended Kalman filter. *Directions in mathematical systems theory and optimization*. Springer, 2003, pp. 173–182.
12. Kruglov S.P., Kovyrrshin S.V. Identification-based speed control of an overhead crane with a reduced cargo transfer model. *Control Sciences*, 2023, no. 4, pp. 25–33. DOI: 10.25728/cs.2023.4.3. Translated from *Problemy upravleniya*, 2023, no. 4, pp. 28–37. DOI: 10.25728/pu.2023.4.3.
13. Kruglov S.P., Aksamentov D.N. Adaptivnoe upravlenie mostovym kranom po skorosti peremeshcheniya telezhki [Adaptive control of the overhead crane by the trolley speed]. *Doklady TUSUR = Proceedings of TUSUR University*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 86–92. DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-86-92.

14. Zhmud V.A., Kuznetsov K.A., Kondratyev N.O., Trubin V.G., Trubin M.V. Akselerometr i giroskop MPU6050: pervoe vklyuchenie na STM32 i issledovanie pokazanii v statike [Accelerometer and gyroscope MPU6050: the first inclusion on STM32 and the study of its indications in statics]. *Avtomatika i programmnaya inzheneriya = Automatics and Software Engineering*, 2018, no. 3 (25), pp. 9–22.
15. Kruglov S.P., Kovyrshin S.V., Butorin D.V. An identification-based control method for an overhead crane with a new combined sensor placement. *Control Sciences*, 2024, no. 4, pp. 52–62. DOI: 10.25728/cs.2024.4.5. Translated from *Problemy upravleniya*, 2024, no. 4, pp. 61–73. DOI: 10.25728/pu.2024.4.5.
16. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory* [Micromechanical devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 400 p.
17. German-Galkin S.G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0* [Computer simulation of semiconductor systems in MATLAB 6.0]. St. Petersburg, Korona Print, 2010. 320 p.
18. ООО «Zetek tekhnologii» [Zetek Technologies LLC]. Website. Available at: [https://www.servosystem.ru/catalog/servotekhnika\\_i\\_servoprivod/](https://www.servosystem.ru/catalog/servotekhnika_i_servoprivod/) (accessed 05.02.2026).

Для цитирования:

Круглов С.П., Ковыршин С.В., Коденёв К.Ф. Измерение параметров угловых движений каната грузоподъемной машины // Системы анализа и обработки данных. – 2026. – № 1 (101) – С. 31–46. – DOI: 10.17212/2782-2001-2026-1-31-46.

For citation:

Kruglov S.P., Kovyrshin S.V., Kodenyov K.F. Izmerenie parametrov uglovykh dvizhenii kanata gruzopod'emnoi mashiny [Measurement of angular movement parameters of the hoisting machine rope]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2026, no. 1 (101), pp. 31–46. DOI: 10.17212/2782-2001-2026-1-31-46.