

УДК (UDC) 621.86

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА
ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ГРУЗОПОДЪЁМНОГО КРАНА ДЭК-251EXPERIMENTAL STUDIES OF LOAD VIBRATIONS WHEN MOVING
THE DEC-251 LOADING CRANEКорытов М.С.¹, Щербаков В.С.¹, Беляков В.Е.², Зубарь А.В.²
Korytov M.S.¹, Sherbakov V.S.¹, Belyakov V.E.², Zubar A.V.²¹ – Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (Омск, Россия)² – Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии
А.В. Хрулёва Министерства обороны Российской Федерации (Омск, Россия)¹ – Siberian State Automobile and Highway University (Omsk, Russia)² – Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army
A.V. Khrulyov of the Ministry of Defence of the Russian Federation (Omsk, Russia)

Аннотация. Измерение параметров колебаний груза, перемещаемого самоходным грузоподъемным краном с гибким канатным подвесом при движении крана по неподготовленной строительной площадке с неровностями, является актуальной задачей, поскольку позволит применять полученные численные значения параметров колебаний, в частности, для повышения точности позиционирования грузов при их перемещении в целевую точку, что актуально при работе грузоподъемных кранов в стесненных условиях. Решение задачи более точного позиционирования позволяет перейти к созданию систем автоматического успокоения неуравновешенных колебаний груза. Производительность крана, у которого перемещаемый груз не совершает неуравновешенных колебаний, существенно повышается. Силовые нагрузки на элементы металлоконструкций крана в случае отсутствия раскачивания груза также существенно снижаются. В статье рассматривается один из способов определения углов отклонений точки груза и точки подвеса груза на стреле при перемещении самоходного крана ДЭК-251 по неровностям строительной площадки с применением проекционно-полиномиальной математической модели оптико-электронной системы. В качестве примера в статье приведён ряд графиков временных зависимостей изменения значений углов отклонений груза и точки подвеса груза при перемещении по неровностям площадки грузоподъемного крана с длиной стрелы 22 метра и углом наклона стрелы 48 градусов. Груз находился на высоте 4,8 метра, масса груза составляла 200 килограмм. Приведены временные графические зависимости колебаний груза и точки подвеса груза в продольной плоскости в виде углов отклонений от центра объектива с учётом микрорельефа. Данные позволяют рассчитать линейные координаты объектов в пространстве. Причем, результаты получены уже с учетом погрешностей камеры.

Ключевые слова: колебания груза, маятник, канат, грузоподъемный самоходный кран, точка подвеса груза.

Abstract. Measurement of the parameters of vibrations of the load moved by a self-propelled crane with a flexible rope suspension when the crane moves along an unprepared construction site with irregularities is an urgent task, since it will allow using the obtained numerical values of the vibration parameters to improve the accuracy of the crane's operation in terms of moving loads. Based on the solution of this problem, it is possible to create systems for automatic damping of cargo vibrations. This will reduce the time spent on performing a work step when moving a load. This also solves the problem of reducing the dynamic loads on the elements of the crane. The article discusses one of the methods for determining the angles of deviations of the point of the load and the point of suspension of the load on the boom when moving the DEK-251 mobile crane along the unevenness of the construction site using the projection-polynomial mathematical model of the optoelectronic system. As an example, the article presents a number of graphs of time dependences of changes in the values of the angles of deviations of the load and the point of suspension of the load when moving over the unevenness of the site of a crane with a boom length of 22 meters and an angle of inclination of the boom of 48 degrees. The cargo was at a height of 4.8 meters, the weight of the cargo was 200 kilograms. The graphical time dependences of the load fluctuations and the load suspension point in the longitudinal plane are given in the form of angles of deviations from the lens center, taking into account the microrelief. The data allows you to calculate the linear coordinates of objects in space. Moreover, the results were obtained taking into account the camera errors.

Keywords: fluctuations of the load, pendulum, rope, self-propelled hoisting crane, load suspension point.

Дата принятия к публикации: 28.05.2021
Дата публикации: 25.09.2021

Date of acceptance for publication: 28.05.2021
Date of publication: 25.09.2021

Сведения об авторах:

Корытов Михаил Сергеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», *e-mail: kms142@mail.ru*.

ORCID: 0000-0002-5104-7568

Щербаков Виталий Сергеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», *e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org*.

ORCID: 0000-0002-3084-2271

Беляков Виталий Евгеньевич – старший преподаватель кафедры «Электрооборудование и автоматика» Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва Министерства обороны Российской Федерации, *e-mail: vitaliy_belyakov@mail.ru*.

ORCID: 0000-0002-0460-1546

Зубарь Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Электрооборудование и автоматика» Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулёва Министерства обороны Российской Федерации, *e-mail: alexeyzubar@gmail.com*.

Authors' information:

Mikhail S. Korytov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Automobiles, Construction Materials and Technologies at Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI), *e-mail: kms142@mail.ru*.

ORCID: 0000-0002-5104-7568

Vitaliy S. Sherbakov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering at Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI), *e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org*.

ORCID: 0000-0002-3084-2271

Vitaliy E. Belyakov – Senior Lecturer of Department of Electrical Equipment and Automatics at Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulyov of the Ministry of Defense of the Russian Federation, *e-mail: vitaliy_belyakov@mail.ru*.

ORCID: 0000-0002-0460-1546

Aleksey V. Zubar – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student of Department of Electrical Equipment and Automation at Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A.V. Khrulyov of the Ministry of Defense of the Russian Federation, *e-mail: alexeyzubar@gmail.com*.

1. Введение

Тенденции развития грузоподъемных кранов неразрывно связаны с тем объемом требований, которые выдвигаются к отрасли подъемно-транспортного оборудования всеми прочими отраслями производства и строительства.

Требования к массам перемещаемых грузов достаточно высоки. Для пролетных конструкций грузоподъемных кранов характерно увеличение длины пролета [2]. Для стреловых кранов – увеличивается вылет стрелы [4], что, в свою очередь, вызывает увеличение допустимой высоты, на которую может быть осуществлен подъём груза [5]. Для мобильных кранов характерно увеличение подвижности [6]. В результате одновременного действия всех указанных тенденций, постепенно область эффективного использования грузоподъемных кранов расширяется.

Среди грузоподъемных кранов можно выделить гусеничные самоходные краны,

которые обладают большой универсальностью, способны при необходимости перемещаться вместе с грузом, могут использоваться не только для погрузочно-разгрузочных работ, но и при монтаже, в том числе в строительстве [6].

Подготовка строительной площадки для работы таких кранов должна быть минимальной или не требуется вообще. Среди других преимуществ – возможность применения сменных стрел различной геометрической формы, как прямых, так и изогнутых. Длина стрелы у монтажных кранов на гусеничном ходу может достигать 60-100 м [7].

Для всех типов грузоподъемных кранов с нежестким подвесом груза (на грузовом канате) актуальной является проблема обвода грузом возможных препятствий, встречающихся на пути перемещения [8]. В последнем случае траектория перемещения груза в пространстве будет непрямолинейной. В равной мере это справедливо и для поворот-

ных стреловых кранов даже при отсутствии препятствий в рабочей области.

Рабочий цикл перемещения груза грузоподъемным краном любого типа, совершенно очевидно, требует разгона груза с ускорением из начального положения равновесия, и торможения груза также с ускорением при достижении конечного (целевого) положения. Любые горизонтальные ускорения груза, находящегося на гибком подвесе маятникового типа, вызывают раскачивание груза и грузового каната относительно гравитационной вертикали [8].

Математически подобная динамическая система упрощенно может быть описана как маятник с подвижной точкой подвеса. Для гусеничного крана последняя точка располагается на оголовке стрелы [7].

Колебания груза в пространстве могут быть разложены по двум вертикально расположенным плоскостям, одна из которых совпадает с направлением продольного движения гусеничного шасси, другая перпендикулярна ему [9, 10]. Маятниковые колебания груза в отдельных плоскостях характеризуются частотой или периодом колебаний и амплитудой, и определяются такими параметрами системы «точка подвеса – груз», как коэффициент демпфирования по углу поворота грузового каната, длины грузового каната от точки подвеса до груза, масса груза, и, наконец, ускорение точки подвеса в горизонтальном направлении [8].

В связи со всем изложенным, экспериментальное измерение параметров колебаний транспортируемого груза, основными из которых являются линейные и связанные с ними угловые координаты, является актуальной, но достаточно сложной для практического решения задачей. Одним из перспективных методов ее решения является использование цифровой фото-видеотехники, позволяющее получить характеристики динамических процессов перемещения груза и подвижных звеньев крана.

2. Постановка задачи

Необходимо с применением цифровой фото-видеокамеры произвести видеосъемку

и на основе ее обработки – последующие измерения координат подвижных точек крана ДЭК-251 (груза и оголовка стрелы) в процессе прямолинейного движения базового шасси по неровностям микрорельефа строительной площадки. При этом необходимо учесть погрешности, создаваемые цифровой фото-видеокамерой.

3. Методика определения координат с учетом погрешности цифровой фото-видеокамеры

В качестве основного средства измерения угловых координат подвижных точек крана была использована цифровая фото-видеокамера Panasonic HC-V130 с последующей покадровой разверткой процесса раскачивания груза. При подборе средства измерения обязательным являлось выполнение условия, чтобы разрешения кадра и видеоизображения были одинаковы.

Применение объективов любой фото-видеокамеры неминуемо связано с сильными радиальными искажениями обрабатываемого цифрового изображения. Для устранения влияния этих искажений возможно осуществление программной попиксельной переработки (пост-обработки) изображения при помощи ЭВМ. Это связано с достаточно значительными вычислительными затратами. Вторым вариантом решения данной проблемы является учёт величин этих искажений непосредственно при описании математической связи между объектом и его изображением. В этом случае точность данного описания будет определяться степенью адекватности применяемой математической модели дисторсии, т.е. степенью ее соответствия техническим характеристикам конкретно взятого объектива. Так, например, компенсация дисторсионных искажений может проводиться на основе выражений Брауна [11]. Однако в реальности объектив может быть изготовлен таким образом, что точное описание вносимых им искажений с помощью известных моделей дисторсии будет являться проблемным. Ситуацию усугубляет применение объектива в совокупности с дополнительными оптическими элементами, которые в любом случае влияют на геометрию обраба-

тываемого изображения, а параметры данного влияния далеко не всегда могут быть известны и учтены в полном объёме.

Сама фото-видеокамера может быть изготовлена с погрешностями, установлена не точно и иметь произвольные и неизвестные углы наклона к плоскости изображения, а также смещение относительно оптической оси объектива. Кроме этого, погрешности могут возникать и в процессе эксплуатации при старении и износе основных элементов оптико-электронной части фото-видеокамеры. В этом случае паспортные технические параметры необходимо рассматривать как величины, известные только с определённой степенью погрешности.

В целом, указанные проблемные вопросы на сегодня решаются достаточно успешно с помощью специальных операций внутренней калибровки цифровых видеокамер. В настоящее время известно и применяется достаточно большое количество методик калибровки как в нашей стране, так и за рубежом. Однако результаты данных методик далеко не всегда имеют необходимый уровень точности и полноту.

В тех случаях, когда известны только основные паспортные данные оптико-электронных систем и нет точной информации об их достоверности, оптимально применять проекционно-полиномиальную математическую модель оптико-электронных систем [11].

Сущность данной модели заключается в применении полиномов $f(n_j^P)$ и $f(m_j^P)$:

$$f(n_j^P) = c_0 + c_1(n_j^P) + c_2(n_j^P)^2 + \dots + c_{q-1}(n_j^P)^{q-1} + c_q(n_j^P)^q = \alpha_j^P; \quad (1)$$

$$f(m_j^P) = d_0 + d_1(m_j^P) + d_2(m_j^P)^2 + \dots + d_{q-1}(m_j^P)^{q-1} + d_q(m_j^P)^q = \beta_j^P, \quad (2)$$

где $n_j^P = n_j^P - 0,5N_j$, $m_j^P = m_j^P - 0,5N_j$ – приведённые пиксельные координаты изображения объекта P в кадре оптико-электронной системы j -ой фотокамеры; α_j^P , β_j^P – углы в горизонтальной и вертикальной плоскостях на объект P относительно оптиче-

ской оси оптико-электронной системы j -й фотокамеры; $c_0, c_1, c_2, \dots, c_q$ и $d_0, d_1, d_2, \dots, d_q$ – полиномиальные коэффициенты прямого преобразования функций $f(n_j^P)$ и $f(m_j^P)$ соответственно.

Коэффициенты полиномов (1), (2) c_q и d_q вычисляются на основании сопоставления действительного значения угла на тест-объект (круг), снятый с углоизмерительной площадки, на которой крепится камера, с расчётным значением угла, полученным на основании значений вектора A_j^P для изображений этого же тест-объекта. Таким образом, разница между снятыми с определённой дискретностью в вертикальной и горизонтальной плоскостях показаниями и соответствующими им расчётными значениями будут представлять собой набор поправок для конкретной оптико-электронной системы.

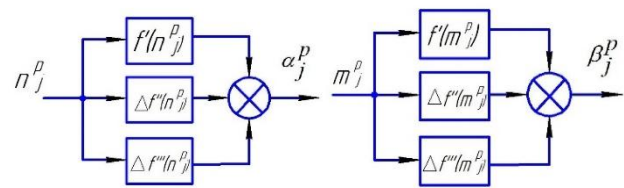


Рис. 1. Блок-схемы последовательностей вычисления конечных значений коэффициентов полиномов $f(n_j^P)$ и $f(m_j^P)$

Полиномы $f(n_j^P)$ и $f(m_j^P)$ выражают математическую зависимость значения угла на объект непосредственно от приведённых пиксельных плоских координат изображения этого объекта в кадре (рис. 1).

Для определения погрешности измерения углов оптико-электронной системой «Panasonic HC-V130», проведен активный эксперимент с применением электронного тахеометра «Spectra Precision Focus». Фото-видеокамера жестко закреплена на электронном тахеометре (рис. 2, а). На расстоянии десяти метров установлена геометрическая фигура (рис. 2, б). Поворачивая камеру сначала слева направо, а затем сверху вниз,

производилась фотофиксация геометрической фигуры (рис. 3, б) с регистрацией углов на электронном дисплее (рис. 2, в).

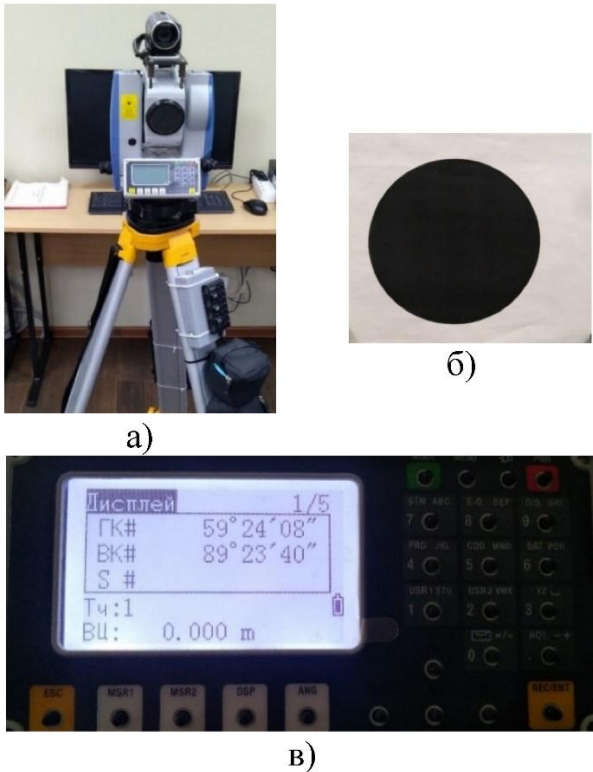


Рис. 2. Экспериментальная установка для определения погрешности углов цифровой камеры: а) камера на углоизмерительной площадке; б) геометрическая фигура (круг), используемая для распознавания центра объекта программой; в) показания углов на тахеометре

Для определения погрешности измерения углов оптико-электронной системой «Panasonic HC-V130», проведен активный эксперимент с применением электронного тахеометра «Spectra Precision Focus». Фото-видеокамера жестко закреплена на электронном тахеометре (рис. 2, а). На расстоянии десяти метров установлена геометрическая фигура (рис. 2, б). Поворачивая камеру сначала слева направо, а затем сверху вниз, производилась фотофиксация геометрической фигуры (рис. 3, б) с регистрацией углов на электронном дисплее (рис. 2, в).

В программном продукте LabVIEW разработана «Программа измерения угловых отклонений» (рис. 3, а). В рабочее окно программы загружается поочередно фото каждого изме-

ренного угла, и она автоматически определяет горизонтальные m и вертикальные n пиксели (рис. 3 б, в) каждой фотографии.

Практические эксперименты показали, что при описании функциональных зависимостей $f(n_j^P)$ и $f(m_j^P)$ с субпиксельной точностью с помощью полиномов шестого порядка, необходимо применение нескольких этапов вычисления коэффициентов $c'_0, c'_1, c'_2, \dots, c'_q$ и $d'_0, d'_1, d'_2, \dots, d'_q$. Каждый этап вычислений рассчитывается по погрешности измерений, не устранённой предыдущим этапом. Таким образом, погрешность оптико-электронной системы «Panasonic HC-V130» определялась по горизонтали и по вертикали приведенными ниже выражениями (3) и (4):

$$f(n_j^P) = f'(n_j^P) + \Delta f''(n_j^P) + \Delta f'''(n_j^P), \quad (3)$$

где

$$f'(n_j^P) = -1 \cdot 10^{-18} n^6 + 4 \cdot 10^{-16} n^5 + 1 \cdot 10^{-12} n^4 - 3 \cdot 10^{-9} n^3 - 5 \cdot 10^{-7} n^2 + 0,0312n - 0,1414;$$

$$\Delta f''(n_j^P) = 1 \cdot 10^{-18} n^6 - 7 \cdot 10^{-17} n^5 - 1 \cdot 10^{-12} n^4 + 8 \cdot 10^{-11} n^3 + 8 \cdot 10^{-7} n^2 - 5 \cdot 10^{-5} n - 0,0494;$$

$$\Delta f'''(n_j^P) = 9 \cdot 10^{-19} n^6 - 1 \cdot 10^{-16} n^5 - 1 \cdot 10^{-12} n^4 + 9 \cdot 10^{-11} n^3 + 5 \cdot 10^{-7} n^2 - 2 \cdot 10^{-5} n - 0,0418.$$

$$f(m_j^P) = f'(m_j^P) + \Delta f''(m_j^P) + \Delta f'''(m_j^P), \quad (4)$$

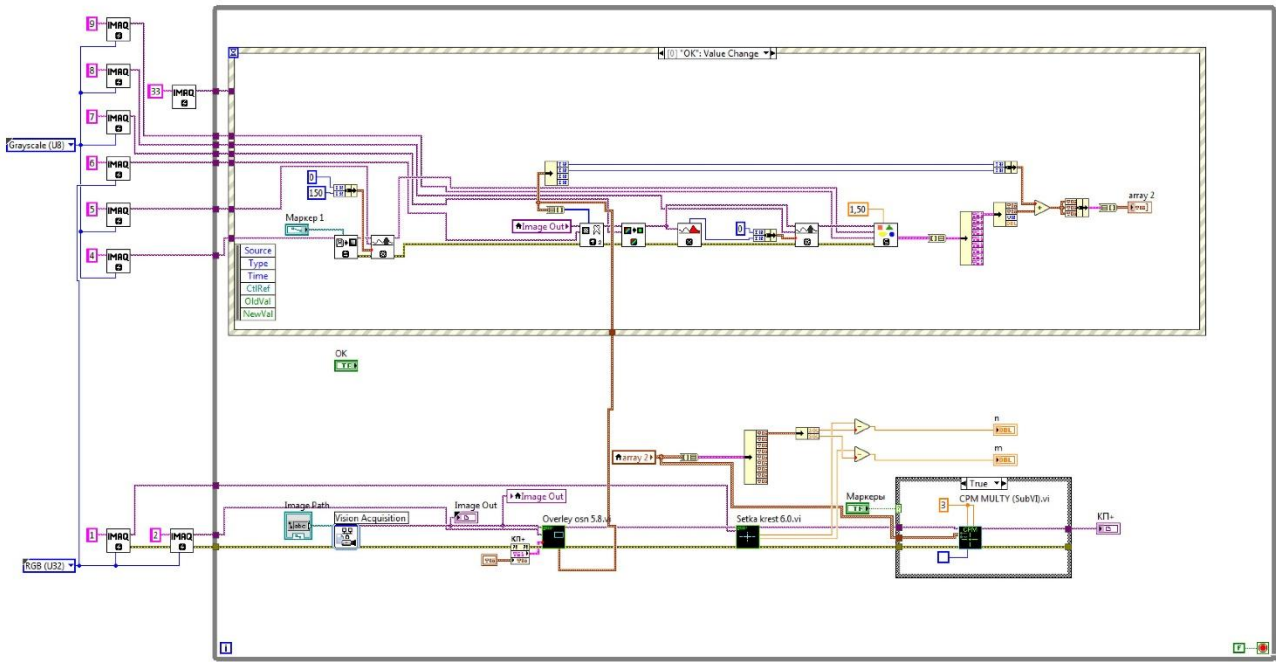
где

$$f'(m_j^P) = 2 \cdot 10^{-17} m^6 - 4 \cdot 10^{-14} m^5 - 4 \cdot 10^{-12} m^4 + 8 \cdot 10^{-9} m^3 + 1 \cdot 10^{-6} m^2 + 0,0306m - 0,9749;$$

$$\Delta f''(m_j^P) = -5 \cdot 10^{-18} m^6 + 9 \cdot 10^{-17} m^5 + 9 \cdot 10^{-14} m^4 - 3 \cdot 10^{-10} m^3 + 8 \cdot 10^{-8} m^2 - 4 \cdot 10^{-5} m + 2 \cdot 10^{-5};$$

$$\Delta f'''(m_j^P) = -1 \cdot 10^{-16} m^6 + 7 \cdot 10^{-15} m^5 + 5 \cdot 10^{-11} m^4 - 1 \cdot 10^{-9} m^3 - 6 \cdot 10^{-6} m^2 + 4 \cdot 10^{-5} m + 0,2005.$$

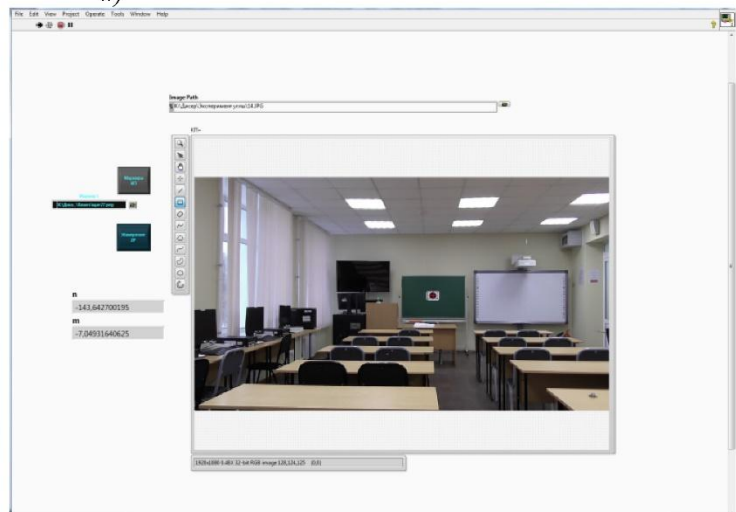
Точность применяемой оптико-электронной системы по горизонтали составила $\alpha = 0,16 \pm 0,024$ град (рис. 4). Точность применяемой оптико-электронной системы по вертикали составила $\beta = 0,14 \pm 0,046$ град (рис. 5).



а)



б)



в)

Рис. 3. Пример применения программного продукта LabVIEW для измерения угловых отклонений точки объекта: а) блок-схема вычислений, реализованная в LabVIEW; б) изображение для определения погрешностей камеры; в) рабочее окно программного продукта

4. Результаты натурального эксперимента

Экспериментальные исследования на гусеничном кране ДЭК-251 проводились путем измерения угловых координат ряда точек по данным цифровой видеосъемки. Это точка на оголовке стрелы и точка на грузе. Координаты точки на оголовке стрелы могут счи-

таться входными параметрами, а координаты точки на грузе – выходными параметрами исследуемой маятниковой системы.

Выполнялось включение электродвигателя механизма перемещения гусеничного шасси дизель-электрического крана.

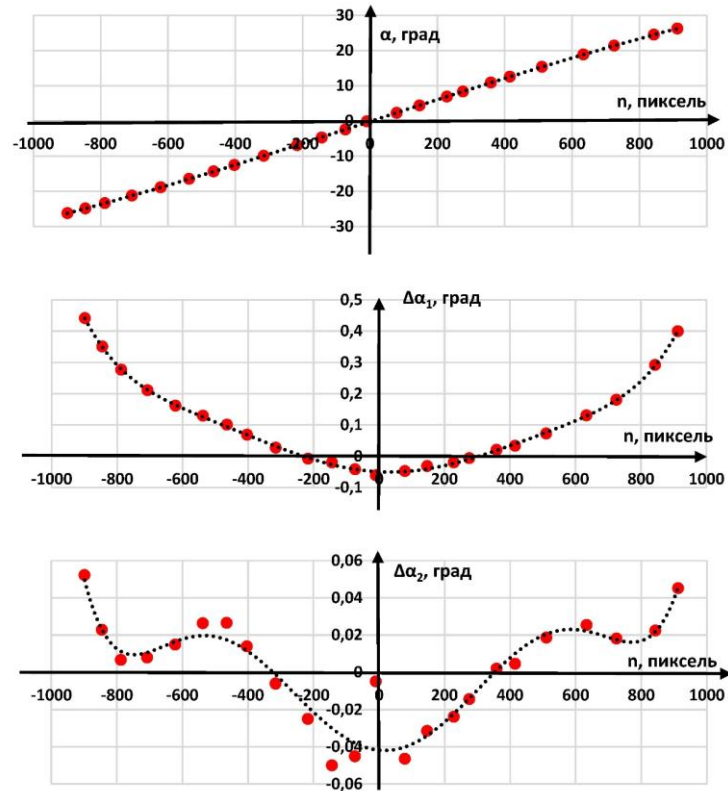


Рис. 4. Определение погрешности камеры между координатами объекта на цифровом изображении и углом α в горизонтальной плоскости относительно оптической оси камеры

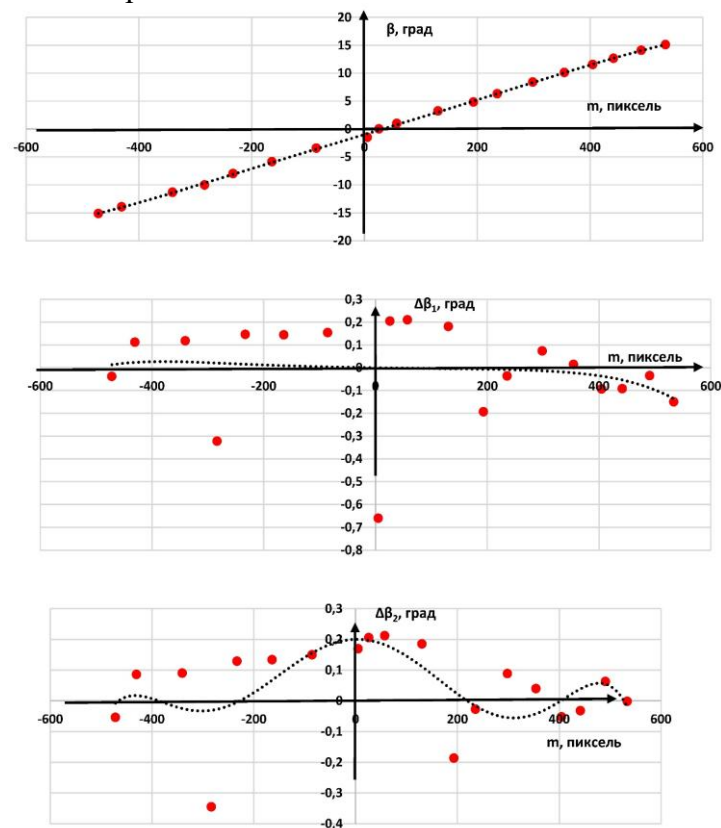


Рис. 5. Определение погрешности камеры между координатами объекта на цифровом изображении и углом β в вертикальной плоскости относительно оптической оси камеры

На горизонтальной площадке объективом вверх была установлена фото-видеокамера (рис. 6), таким образом, чтобы точка перемещения груза перемещалась с одной стороны объектива опико-электронной системы до противоположной стороны объектива опико-электронной системы при движении крана (рис. 7). Метка на грузе в процессе перемещений оставалась все время в пределах объектива.

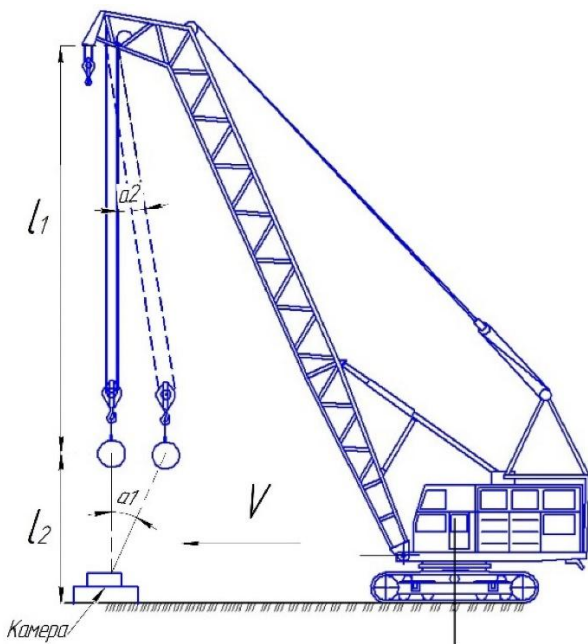
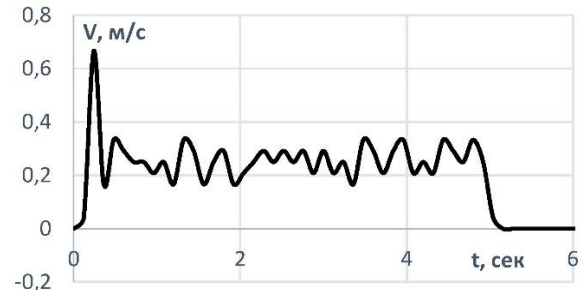


Рис. 6. Схема продольных углов отклонений груза, возникающих при перемещении грузоподъемного крана

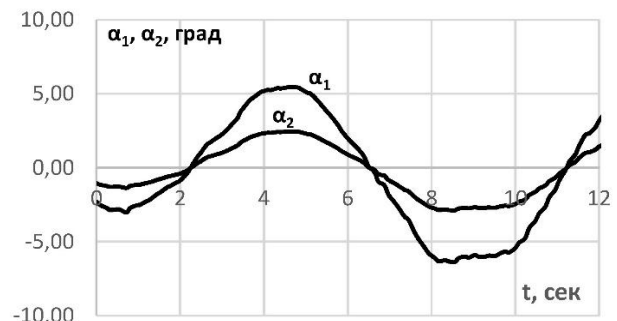


Рис. 7. Изображение в объективе камеры при проведении экспериментальных исследований по определению углов раскачивания груза при перемещении крана ДЭК-251 (пример)

Обработка всех экспериментальных данных, согласно изложенной выше методике, осуществлялась после окончания натурального эксперимента.



а)



б)

Рис. 8. Временные зависимости скорости шасси, углов отклонения груза, полученные экспериментально: а) линейная скорость передвижения шасси крана; б) продольные углы колебаний груза и точки подвеса

Интервал дискретизации времени Δt при кадровой обработке видеозаписи принимался равным 0,12 с.

Координаты точек оголовка стрелы и метки на грузе измерялись сначала в пикселях, сохранялись в виде простого текстового файла, затем импортировались в программу для работы с таблицами MS Excel, где преобразовывались в табличный вид.

MS Excel использовался также для математической обработки результатов и построения графиков. Полученные в качестве примера результаты эксперимента представлены на рис. 8.

5. Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований получены графики колебаний груза и грузового каната в про-

дольной плоскости в виде углов отклонений от центра объектива. Данные графики, при известном линейном расстоянии от объектива камеры (когда объект располагается по центру объектива, т.е. углы нулевые), позволяют рассчитать линейные координаты объектов, т.е. точки подвеса грузового каната и точки груза. Причем, результаты в угловом выражении получены уже с учетом погрешностей камеры. На основе приведенных и других аналогичных им результатов, может

быть выполнена проверка адекватности математической модели крана, уточнение значений параметров модели, оценка эффективности предлагаемых решений и т.д.

Результаты исследований могут представлять интерес для всех исследователей, использующих цифровую фото- и видеоаппаратуру для проведения натуральных экспериментов на движущихся образцах техники, в частности, строительных, дорожных и подъемно-транспортных машинах.

Список литературы

1. Ji Y., Leite F. Automated tower crane planning: leveraging 4-dimensional BIM and rule-based checking // *Automation in construction*. 2018. Vol. 9. Pp. 78-90. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.05.003
2. Pal U., Mukhopadhyay G., Sharma A., Bhattacharya S. Failure analysis of wire rope of ladle crane in steel making shop // *International journal of fatigue*. 2018. Vol. 116. Pp. 149-155. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.06.019
3. Mori Y., Tagawa Y. Vibration controller for overhead cranes considering limited horizontal acceleration // *Control engineering practice*. 2018. Vol. 81. Pp. 256-263. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.09.009
4. Zhang Z., Wu Y., Huang J. Differential-flatness-based finite-time anti-swing control of underactuated crane systems // *Nonlinear Dynamics*. 2017. Vol. 87. No. 3. Pp. 1749-1761. DOI: 10.1007/s11071-016-3149-7
5. La V.D., Nguyen K.T. Combination of input shaping and radial spring-damper to reduce tridirectional vibration of crane payload // *Mechanical systems and signal processing*. 2019. Vol. 116. Pp. 310-321. DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.06.056
6. Le A.T., Lee S.G. Modeling and advanced sliding mode controls of crawler cranes considering wire rope elasticity and complicated operations // *Mechanical systems and signal processing*. 2018. Vol. 103. Pp. 250-263. DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.09.045
7. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Titenko V. V., Belyakov V. E. Studying the effect of the length of equalizing ropes and the corner of the platform on the stability of the crawler crane in the mode of movement with

References

1. Ji Y., Leite F. Automated tower crane planning: leveraging 4-dimensional BIM and rule-based checking. *Automation in construction*, 2018, Vol. 9, pp. 78-90. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.05.003
2. Pal U., Mukhopadhyay G., Sharma A., Bhattacharya S. Failure analysis of wire rope of ladle crane in steel making shop. *International journal of fatigue*, 2018, Vol. 116, pp. 149-155. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.06.019
3. Mori Y., Tagawa Y. Vibration controller for overhead cranes considering limited horizontal acceleration. *Control engineering practice*, 2018, Vol. 81, pp. 256-263. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.09.009
4. Zhang Z., Wu Y., Huang J. Differential-flatness-based finite-time anti-swing control of underactuated crane systems. *Nonlinear Dynamics*, 2017, Vol. 87, No. 3, pp. 1749-1761. DOI: 10.1007/s11071-016-3149-7
5. La V.D., Nguyen K.T. Combination of input shaping and radial spring-damper to reduce tridirectional vibration of crane payload. *Mechanical systems and signal processing*, 2019, Vol. 116, pp. 310-321. DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.06.056
6. Le A.T., Lee S.G. Modeling and advanced sliding mode controls of crawler cranes considering wire rope elasticity and complicated operations. *Mechanical systems and signal processing*, 2018, Vol. 103, pp. 250-263. DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.09.045
7. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Titenko V.V., Belyakov V.E. Studying the effect of the length of equalizing ropes and the corner of the platform on the stability of the crawler crane in the mode of movement with

the cargo // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1546(1). Pp. 012135. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012135

8. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Titenko V. V., Belyakov V. E. Spherical pendulum model with a moving suspension point in the problem of spatial load movement by a hoisting crane with oscillation limiting // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441. No. 1. Pp. 012102. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012102

9. Matsunaga M., Nakamoto M., Yamamoto T. A sound-based measurement of sway angle for anti-sway control of overhead crane // *Journal of robotics networking and artificial life*. 2018. Vol. 4 No. 4. Pp. 322–325. DOI: 10.2991/jrnal.2018.4.4.14

10. Sun N., Wu Y., Chen H., Fang Y. Antiswing cargo transportation of underactuated tower crane systems by a non-linear controller embedded with an integral term // *IEEE transactions on automation science and engineering*. 2019. Vol. 16. No. 3. Pp. 1387–1398. DOI: 10.1109/TASE.2018.2889434

11. Зубарь А.В. Автоматизация процессов настройки параметров систем управления огнём образцов бронетанкового вооружения. Омск: ОАБИИ, 2020. 174 с.

the cargo. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1546, No. 1, pp. 012135. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012135

8. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Titenko V. V., Belyakov V. E. Spherical pendulum model with a moving suspension point in the problem of spatial load movement by a hoisting crane with oscillation limiting // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1441. No. 1. Pp. 012102. doi: 10.1088/1742-6596/1441/1/012102

9. Matsunaga M., Nakamoto M., Yamamoto T. A sound-based measurement of sway angle for anti-sway control of overhead crane. *Journal of robotics networking and artificial life*, 2018, Vol. 4, No. 4, pp. 322–325. DOI: 10.2991/jrnal.2018.4.4.14

10. Sun N., Wu Y., Chen H., Fang Y. Antiswing cargo transportation of underactuated tower crane systems by a non-linear controller embedded with an integral term. *IEEE transactions on automation science and engineering*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 1387–1398. DOI: 10.1109/TASE.2018.2889434

11. Zubary A.V. *Avtomatizatsiya protsessov nastroyki parametrov sistem upravleniya ognym obraztsov bronetankovogo vooruzheniya* [Automation of processes for setting parameters of fire control systems for armored weapons]. Omsk, OABII, 2020. 174 p.