

## МАШИННОЕ ЗРЕНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МОСТОВОГО КРАНА

Седогин М.А., Лимаров А.И.

БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

### Аннотация

В работе исследуются возможности системы машинного зрения в качестве вспомогательного инструмента для оценки эффективности работы системы управления электроприводом мостового крана. Анализируются недостатки моделирования систем гашения колебаний груза, приводится возможность тестирования данных систем на базе лабораторных макетов мостовых кранов. Предлагается метод оценки эффективности системы гашения колебаний на основе вычисления угла отклонения и амплитуды колебаний груза. Приводится способ определения угла отклонения груза при помощи микроэлектромеханических систем (МЭМС) с функциями акселерометра, описывается принцип их работы. Оценивается точность определения угла отклонения при помощи МЭМС, анализируются достоинства и недостатки данного метода. Оценивается возможность применения систем машинного зрения для определения угла отклонения груза, перемещаемого мостовым краном. Приводится алгоритм вычисления амплитуды колебаний груза с помощью использования системы машинного зрения на лабораторном стенде однобалочного мостового крана. Приводится алгоритм сравнения результатов определения угла отклонения груза при помощи МЭМС и системы машинного зрения. Предлагается комбинированная система оценки эффективности системы гашения колебаний перемещаемого мостовым краном груза на базе совместного использования МЭМС и системы машинного зрения.

**Ключевые слова:** мостовой кран, электропривод, пространственные колебания груза, микроэлектромеханические системы, машинное зрение, гашения колебаний.

## MACHINE VISION AS TOOL FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF OVERHEAD CRANE ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM

Mikhail Sedogin, Aleksandr Limarov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

### Abstract

The paper examines possibilities of a machine vision system as auxiliary tool for evaluating the efficiency of an overhead crane electric drive control system. The shortcomings of modeling load oscillation damping systems are analyzed, the possibility of testing these systems using overhead cranes laboratory models is presented. A method for evaluating the effectiveness of the vibration damping system based on calculating the deflection angle and the amplitude of vibrations of a load is proposed. A method for determining the load deviation angle using microelectromechanical systems (MEMS) with accelerometer functionality is presented, the principle of their operation is described. The accuracy of angle determination using MEMS is evaluated, the advantages and disadvantages of this method are analyzed. The potential of using machine vision systems to determine the deviation angle of a load moved by an overhead crane is assessed. An algorithm for calculating the load oscillation amplitude using a machine vision system on a laboratory single-girder overhead crane test bench is provided. An algorithm for comparing the results of load deviation angle determination using both MEMS and a machine vision system is presented. A combined system for evaluating the effectiveness of the vibration damping system of a load moved by an overhead crane based on the joint use of MEMS and a machine vision system is proposed.

**Keywords:** overhead crane, electric drive, spatial load oscillations, microelectromechanical systems, machine vision, vibration damping



## Введение (Introduction)

Мостовые краны занимают важную роль в современной промышленности. Они применяются для перемещения грузов различных масс и габаритов в цехах, на складах и других производственных помещениях [1].

В процессе транспортировки грузов мостовым краном происходит их подъем и перемещение. Если использовать в качестве грузозахватного устройства крюковую подвеску, закрепленную на канатах, то в данные моменты будут возникать пространственные колебания грузов (рис. 1) [2]. Данные колебания носят непрогнозируемый характер, значительно снижают производительность работы мостового крана и точность позиционирования перемещаемого груза [3].

Колебания грузов возникают преимущественно в моменты начала и окончания процессов перемещения и подъема груза мостовым краном.

Следовательно, для решения данной проблемы необходимо осуществлять управление электродвигателями соответствующих механизмов крана. В современных системах управления электроприводов интегрируются системы гашения колебаний грузов [4].

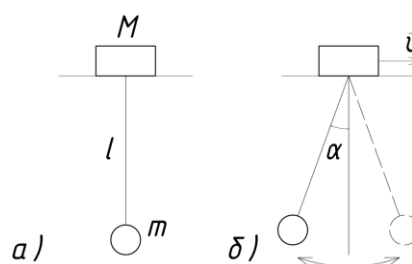
Математическое моделирование систем гашения колебаний не позволяет полностью определить эффективность их работы, так как не учитывает внешние возмущения (ветер, сопротивление воздуха, сила трения) [5]. Для точной оценки работы системы необходимо производить ее исследование на реальном объекте. С учетом высокой стоимости мостовых кранов целесообразно тестирование на базе лабораторных макетов [6]. При этом ключевым параметром, который необходимо определять, является угол отклонения груза. С его помощью становится возможным вычисление амплитуды колебаний груза, значение которой позволяет оценить эффективность работы системы гашения колебаний [7].

В настоящее время в промышленности наблюдается тенденция к использованию технологий машинного зрения для управления процессами производства, в частности для осуществления оперативного контроля за процессом перемещения грузов мостовым краном [8]. Системы машинного зрения также возможно применять для определения угла отклонения груза [9]. Целью данной работы является исследование возможностей системы машинного зрения в качестве вспомогательного инструмента, позволяющего определить эффективность работы системы гашения колебаний груза, которая является частью системы управления мостового крана.

## Материалы и методы (Materials and Methods)

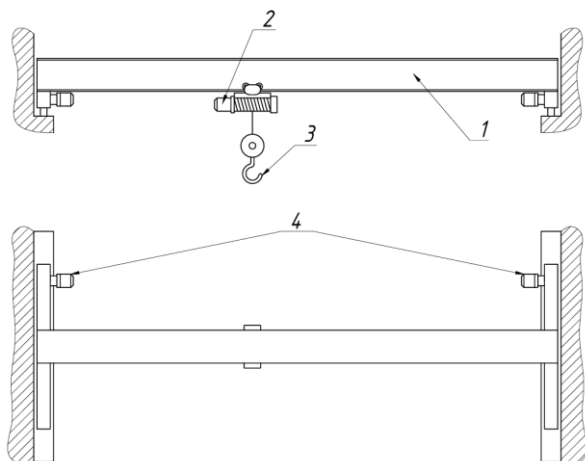
Объектом исследования в данной работе является лабораторный макет однобалочного мостового крана (рис. 2). Перемещение груза производится в двух направлениях: продольном (работа электропривода передвижение моста) и поперечном (работа электропривода подъема).

В настоящее время для определения величины угла отклонения перемещаемого мостовым краном груза является применение акселерометров – приборов, измеряющих проекцию кажущегося ускорения груза [10]. По количеству осей, вдоль которых возможно определять угол отклонения, акселерометры делятся на одноосевые (рис. 3, а), двухосевые (рис. 3, б) и трехосевые.



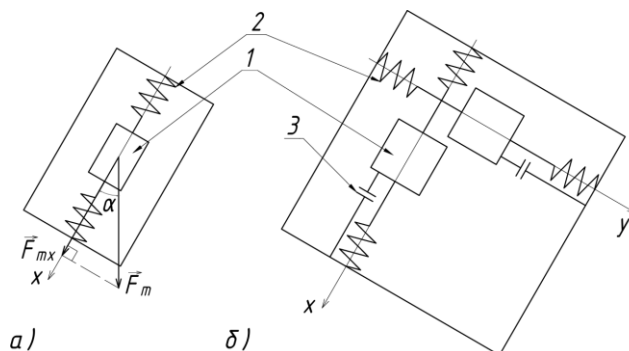
**Рис. 1. Процесс возникновения пространственных колебаний:**  
 а) груз в состоянии покоя;  
 б) груз при его перемещении;  
 $M$  – масса крана;  $m$  – масса груза;  
 $l$  – длина подвеса;  $\alpha$  – угол отклонения





**Рис. 2. Схема мостового однобалочного крана:**

1 – мост; 2 – электропривод подъема (тельфер); 3 – грузозахватное устройство (крюк); 4 – электроприводы колес крана



**Рис. 3. Схемы акселерометров:**

а) одноосевой механический;  
 б) двухосевой электронный;  
 1 – груз измерительный; 2 – подвес;  
 3 – переменный конденсатор

Кажущимся ускорением называется разность между полным ускорением груза и ускорением свободного падения. Следовательно, в случае, когда на акселерометр не действует никаких сил, кроме силы тяжести, он будет производить измерения ускорения свободного падения. Проекция силы тяжести на ось *x* будет равна (по рис. 3, а):

$$F_{Tx} = F_T \cos \alpha = m g \cos \alpha, \tag{1}$$

где *m* – масса акселерометра, кг; *g* – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол отклонения акселерометра, град.

Угол отклонения акселерометра будет равен:

$$\alpha = \arccos(F_{Tx} / F_T) = \arccos(F_{Tx} / mg) \tag{2}$$

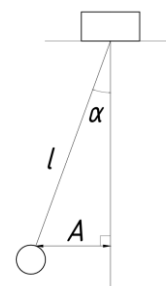
Например, в ходе измерения проекции силы тяжести было получено значение 0,707*mg*. Тогда угол отклонения по формуле (2):

$$\alpha = \arccos(0,707mg / mg) = \arccos(0,707) = 45^\circ.$$

В настоящее время широкое применение нашли микроэлектромеханические системы (МЭМС) с функциями акселерометра. Одной из таких систем является датчик MPU6050 с модулем GY-521. Данный модуль представляет собой трехосевой электронный акселерометр. В этом типе акселерометров определение угла производится при помощи конденсатора с подвижными обкладками. При отклонении акселерометра измерительный груз отклоняется на подвесах, изменяя расстояние между обкладками конденсатора. Оценка эффективности системы гашения колебаний будет производиться путем определения амплитуды колебаний груза, которую можно определить из геометрического соотношения, представленного на рис. 4.

Амплитуда колебаний будет равна:

$$A = l \cdot \sin \alpha. \tag{3}$$



**Рис. 4. Определение амплитуды колебаний груза:**

*l* – длина подвеса;  
*A* – амплитуда колебаний;  
 $\alpha$  – угол отклонения



Метод измерения угла отклонения при помощи МЭМС-датчиков обладает высокой точностью при определении угла в статике. При этом одним из недостатков данного метода является низкая точность измерений в случае, когда груз имеет малую массу, то есть обладает малым значением инерции [11]. Другим недостатком измерения угла отклонения при помощи МЭМС-датчиков является необходимость предварительной калибровки акселерометра [12]. В случае, если датчик будет настроен некорректно, при проведении измерений может присутствовать статическая ошибка. Для вычисления амплитуды также необходимо определить значение длины подвеса.

Из анализа данных недостатков следует, что точную оценку эффективности системы гашения колебаний с помощью МЭМС-датчиков возможно произвести в процессе перемещения грузов большой массы при осуществлении предварительной калибровки датчика. Эффективность системы при перемещении грузов малой массы не может быть оценена. Несмотря на недостатки, данный способ можно применять не только на лабораторном стенде, но и на промышленном мостовом кране.

Определение угла отклонения груза для лабораторного макета мостового крана возможно с использованием системы машинного зрения. Программное обеспечение системы машинного зрения производит обработку изображения с камер, устанавливаемых на стены, к которым крепятся опоры однобалочного мостового крана. В данном случае ПО позволяет сразу определить амплитуду колебаний груза и длину подвеса. Угол отклонения можно определить из формулы (3):

$$\alpha = \arcsin(A / l). \quad (4)$$

Алгоритм работы системы машинного зрения при определении амплитуды колебаний и угла отклонения груза представлен на рис. 5.

Система машинного зрения позволяет с высокой точностью визуально определить значение угла отклонения угла. При этом точность измерения не будет зависеть от массы груза, а программное обеспечение не требует постоянной предварительной калибровки. Для его точной работы необходима лишь единоразовая первоначальная настройка. Следовательно, применение системы машинного зрения позволяет с высокой точностью в условиях неизвестной массы перемещаемого груза оценить эффективность работы системы гашения колебаний. При этом данную систему невозможно использовать для определения амплитуды колебаний промышленного мостового крана вследствие зависимости эффективности работы камер от внешних условий (освещение, загрязнение помещения и т.д.).

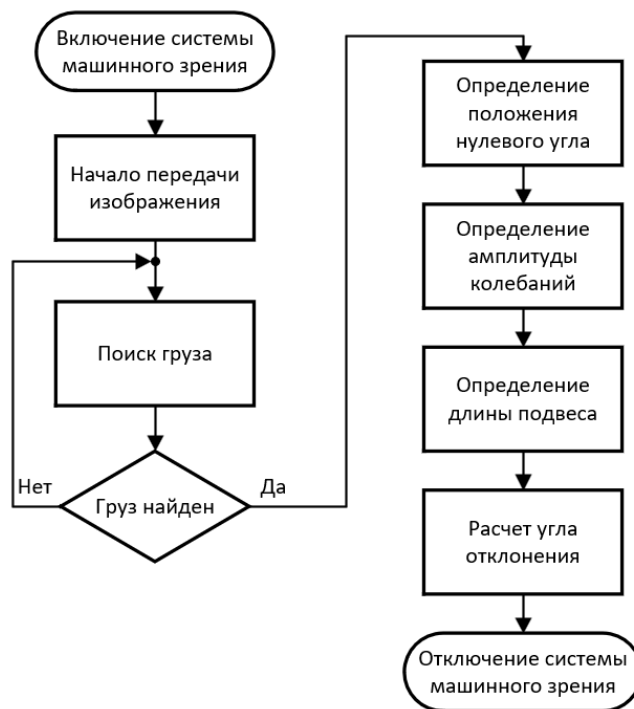


Рис. 5. Алгоритм определения амплитуды колебаний груза и угла его отклонения



## Результаты (Results)

На основе исследования двух методов определения угла отклонения перемещаемого лабораторным макетом мостового крана груза можно сформировать комбинированную систему оценки системы гашения колебаний. В данной системе машинное зрение выступает в качестве вспомогательного инструмента, предназначенного для калибровки МЭМС-датчика, который впоследствии возможно использовать для оценки эффективности промышленного мостового крана.

Алгоритм работы комбинированной системы оценки системы гашения колебаний представлен на рис. 6.

## Выводы (Conclusion)

Применение МЭМС-датчиков для определения угла отклонения перемещаемого мостовым краном груза позволяет оценить эффективность работы промышленного мостового крана, при этом данный тип датчиков требует предварительной настройки, а точность определения угла зависит от массы перемещаемого груза.

Применение системы машинного зрения позволяет точно осуществить определение угла отклонения и амплитуды колебаний груза в независимости от его массы. При этом эффективность работы системы зависит от внешних условий в связи с наличием в ее конструкции камер.

Совместное применение МЭМС-датчика и системы машинного зрения позволяет использовать машинное зрение как вспомогательный элемент для настройки датчика, который впоследствии можно применять для оценки эффективности системы гашения колебаний промышленного мостового крана, которая входит в систему управления его электроприводами.

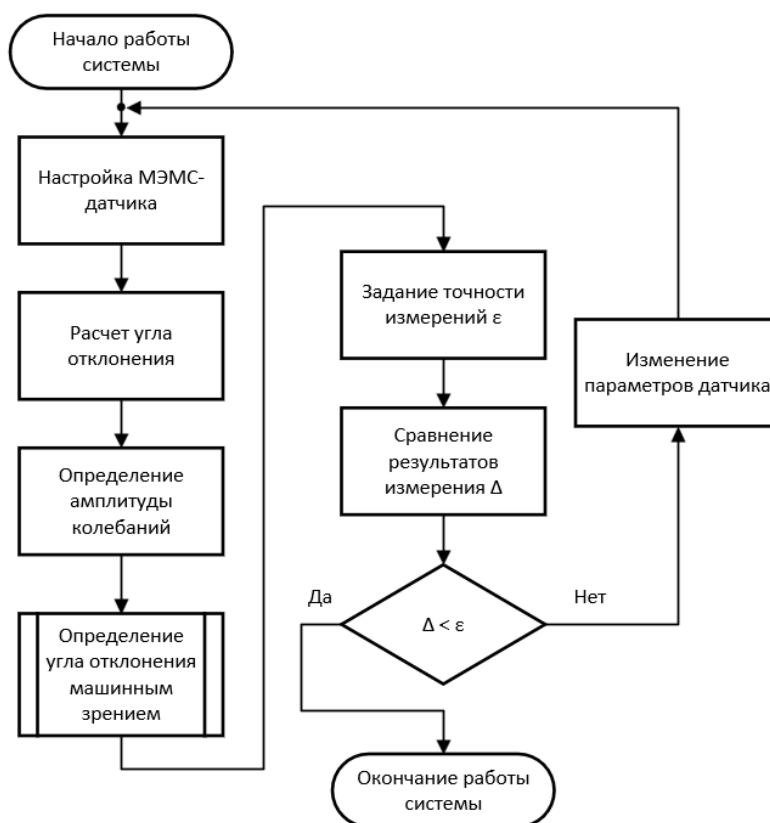


Рис. 6. Алгоритм работы комбинированной системы оценки системы гашения колебаний



## Информация о финансировании (Acknowledgments)

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

## Библиографический список

1. Рыжих Т.А., Жучков М.Л., Польшин А.А., Тихонов А.А. Исследование классификации мостовых кранов // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2021. – № 1. – С. 104-109. EDN: [SWUDGL](#)
2. Подвальный С.Л., Калтырина А.А., Васильев Е.М. Синергетическая система нечёткого управления подвешенным грузом // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 7-17. EDN: [GHJABP](#). DOI: [10.36622/VSTU.2022.18.3.001](#)
3. Корытов М.С., Шершнева Е.О., Абдулаева О.В. Способы приближения фактической траектории перемещения груза мостовым краном к требуемой // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 8. – С. 27-33. EDN: [PLLHZI](#)
4. Федорещенко Н.В. Гашение колебаний груза подъемно-транспортных механизмов // iPolytech Journal. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 61-73. EDN: [VONGTE](#). DOI: [10.21285/1814-3520-2023-1-61-73](#)
5. Антипов А.С., Ткачева О.С. Робастное управление ходовой тележкой однобалочного мостового крана при действии несогласованных возмущений и при неполных измерениях // Управление большими системами: сборник трудов. – 2023. – № 105. – С. 41-64. EDN: [XNAQUV](#). DOI: [10.25728/ubs.2023.105.3](#)
6. Аксаментов Д.Н. Исследование адаптивного закона управления мостовым краном на его макете // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 2. – С. 47-57. EDN: [FIEVXO](#). DOI: [10.17588/2072-2672.2022.2.047-057](#)
7. Бажутин Д.В., Павлыш В.Н. Оценка амплитуды остаточных колебаний груза в автоматизированных крановых установках в условиях неточного определения длины подвеса // Проблемы искусственного интеллекта. – 2025. – № 2. – С. 106-115. EDN: [SWYYDO](#). DOI: [10.24412/2413-7383-2025-2-37-106-115](#)
8. Солдатенков А.С., Малышева А.Д., Седогин М.А. Особенности применения системы машинного зрения для управления электроприводом мостового крана // Энергетические системы. – 2024. – № 4. – С. 50-57. EDN: [UKDRLY](#). DOI: [10.34031/ES.2024.4.005](#)
9. Корытов М.С., Щербаков В.С., Беляков В.Е., Зубарь А.В. Экспериментальные исследования колебаний груза при перемещении грузоподъемного крана ДЭК-251 // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2021. – № 3. – С. 217-226. EDN: [OCFDUP](#). DOI: [10.22281/2413-9920-2021-07-03-217-226](#)
10. Прохорцов А.В., Минина О.В. Обзор высокоточных акселерометров российских производителей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 10. – С. 301-305. EDN: [QXAGNA](#)
11. Жмудь В.А., Кузнецов К.А., Кондратьев Н.О., Трубин В.Г., Трубин М.В. Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике // Автоматика и программная инженерия. – 2018. – № 3(25). – С. 9-22. EDN: [YALYRF](#)
12. Ивойлов А.Ю. О применении МЭМС-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2017. – № 3(89). – С. 32-51. EDN: [YLSUWO](#). DOI: [10.17212/2307-6879-2017-3-32-51](#)

## References

1. Ryzhih, T. A., Zhuchkov, M. L., Pol'shin, A. A. & Tihonov, A. A. (2021). Study of regularities of electric hoist operation and its classification in modern production. *Vysokie tehnologii v stroitel'nom komplekse*, 1, 104-109.



2. Podval'ny, S. L., Kaltyrina, A. A., & Vasil'ev, E. M. (2022). Synergic system of fuzzy control for suspended load. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 18(3), 7-17. <https://doi.org/10.36622/vstu.2022.18.3.001>.
3. Korytov, M. S., Shershneva, E. O., & Abdulaeva, O. V. (2021). Analysis methods approach the actual path of the overhead crane to load required. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 8, 27-33.
4. Fedoreshchenko, N. V. (2023). Damping of oscillations of load lifted by handling equipment. *iPolytech Journal*, 27(1), 61-73. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-61-73>.
5. Antipov, A. S., Tkacheva, O. S. (2023). Robust control of the trolley of a single girder overhead crane under the action of unmatched perturbations and incomplete measurement. *Large-scale systems control*, 105, 41-64. <https://doi.org/10.25728/ubs.2023.105.3>.
6. Aksamentov, D. N. (2022). Study of adaptive control law of overhead crane using its model. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta*, 2, 47-57. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2022.2.047-057>
7. Bazhutin, D. V., & Pavlysh, V. N. (2025). Estimation of residual payload swing amplitude for automated crane units subjected to inaccurate cable length value. *Problems of Artificial Intelligence*, 2, 106-115. <https://doi.org/10.24412/2413-7383-2025-2-37-106-115>.
8. Soldatenkov, A. S., Malysheva, A. D., & Sedogin, M. A. (2024). Features of application of machine vision system for controlling electrical drive of overhead crane. *Energy Systems*, 4, 50-57. <https://doi.org/10.34031/es.2024.4.005>
9. Korytov, M. S., Sherbakov, V. S., Belyakov, V. E. & Zubar, A. V. (2021). Experimental studies of load vibrations when moving the dec-251 loading crane. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 3, 217-226. <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2021-07-03-217-226>.
10. Prokhortsov, A. V., & Minina, O. V. (2019). Overview of high-precision accelerometers of Russian manufacturers. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki*, 10, 301-305.
11. Zhmud, V. A., Kuznetsov, K. A., Kondratyev, N. O., Trubin, V. G. & Trubin M.V. (2018). Akselerometr i giroskop MPU6050: pervoe vklyuchenie na STM32 i issledovanie pokazanij v statike [Accelerometer and Gyroscope MPU6050: the First Inclusion on STM32 and the Study of its Indications in Statics]. *Avtomatika i programmnaya inzheneriya*, 3(25), 9-22.
12. Ivoilov A.Yu. (2017). About the application of MEMS Sensors in the development of two-wheeled robot Automatic stabilization system. *Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, 3(89), 32-51. <https://doi.org/10.17212/2307-6879-2017-3-32-51>.

### Сведения об авторах

**Седогин Михаил Александрович**, студент магистратуры, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, SPIN-код: [1635-4289](https://doi.org/10.26907/2542-8762.2025.4.79-85).

**Лимаров Александр Игоревич**, канд. техн. наук, доц., кафедра электроэнергетики и автоматизации, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

### Authors about

**Mikhail A. Sedogin**, graduate student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Power engineering and automatics Department.

**Aleksandr I. Limarov**, Cand. of Tech. Sciences, Assoc. Prof., Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Power engineering and automatics Department.

### Ссылки для цитирования

Седогин М.А., Лимаров А.И. Исследование способов определения угла отклонения груза, перемещаемого мостовым краном // Энергетические системы. – 2025. – № 4. – С. 79-85.

Sedogin, M., Limarov A. (2025). Machine vision as tool for evaluating the effectiveness of overhead crane electric drive control system. *Energy Systems*, 4, 79-85. <https://doi.org/10.34031/es.2025.3.09>

