

УДК 621.873.25

DOI 10.17513/snt.39697

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ БАШЕННЫМ КРАНОМ

Морозов В.В., Мадьяров Т.М., Шаруха А.В., Чашин М.С.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень,

e-mail: morozov1990_72@mail.ru

В статье представлены результаты исследования по разработке системы дистанционного управления башенным краном. Выполнение работы было направлено на решение такой научной проблемы, как повышение безопасности и эффективности эксплуатации наземных транспортно-технологических средств и их комплексов путем автоматизации транспортно-складских и погрузочно-разгрузочных работ. Проведенные аналитические исследования показали, что данная проблема во многом обуславливается удаленным расположением кабины машиниста башенного крана от места проведения работ. Обозначенный фактор не только создает риск получения травмы или летального исхода оператора, но и влечет за собой временные потери и снижение эксплуатационной производительности техники. Решение проблемы с точки зрения авторов заключалось в необходимости полного исключения нахождения оператора башенного крана на опасной высоте. Для этого была рассмотрена возможность перевода башенного крана на дистанционное управление. По результатам исследования была разработана и предложена система дистанционного управления башенным краном, реализуемая при помощи мобильного приложения на операционной системе Android. Разработка программного приложения осуществлялась на основе программного языка Arduino. Для тестирования предложенной системы дистанционного управления была разработана модель башенного крана. Изготовление элементов башенного крана производилось при помощи программного комплекса SolidWorks и 3D-принтера Kingroon Kp3S. По результатам работы была произведена оценка эффективности предлагаемых решений. Исследование выполнено за счет гранта Некоммерческой организации «Благотворительный фонд «ЛУКОЙЛ» для молодых преподавателей.

Ключевые слова: башенный кран, кран стрелового типа, дистанционное управление, автоматизация транспортно-складских и погрузочно-разгрузочных работ

Исследование выполнено за счет гранта Некоммерческой организации «Благотворительный фонд «ЛУКОЙЛ» для молодых преподавателей.

DESIGN OF A TOWER CRANE REMOTE CONTROL SYSTEM

Morozov V.V., Madyarov T.M., Sharukha A.V., Chaschin M.S.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, e-mail: morozov1990_72@mail.ru

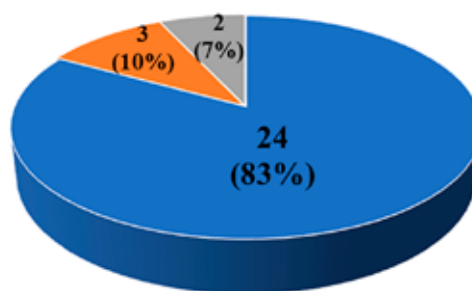
The article presents the results of a study on the development of a remote control system for a tower crane. The implementation of the work was aimed at solving such a scientific problem as improving the safety and efficiency of the operation of ground transport and technological facilities and their complexes by automating transport and storage and loading and unloading operations. Analytical studies have shown that this problem is largely due to the remote location of the driver's cab of the tower crane from the place of work. This factor not only creates a risk of injury or death of the operator, but also entails temporary losses and a decrease in the operational performance of the equipment. The solution to the problem from the point of view of the authors was the need to completely exclude the presence of the tower crane operator at a dangerous height. For this purpose, the possibility of transferring the tower crane to remote control was considered. Based on the results of the study, a remote control system for a tower crane was developed and proposed, implemented using a mobile application on the Android operating system. The software application was developed on the basis of the Arduino programming language. To test the proposed remote control system, a model of a tower crane was developed. The elements of the tower crane were manufactured using the SolidWorks software package and the Kingroon Kp3S 3D printer. Based on the results of the work, the effectiveness of the proposed solutions was evaluated. The research was carried out at the expense of a grant from the Non-profit organization «LUKOIL Charitable Foundation» for young teachers.

Keywords: tower crane, boom type crane, remote control, automation of transport and storage and loading and unloading operations

The study was supported by a grant from the Non-Commercial Organization "LUKOIL Charitable Foundation" for young teachers.

В настоящее время на территории Российской Федерации эксплуатируется более 600 тыс. подъемных сооружений, установленных стационарно. Более 35% из них относятся к различным грузоподъемным

кранам [1]. С 2019 по 2021 г. самая высокая аварийность зафиксирована именно при эксплуатации кранов. В качестве примера распределение аварий на подъемных сооружениях представлено на рис. 1.



■ Грузоподъемные краны ■ Подъемники (вышки) ■ Фасадные подъемники

Рис. 1. Количественное и процентное распределение числа аварий за 2021 г. по видам подъемных сооружений [1]

Половина всех аварий за 2021 г. на грузоподъемных кранах связана с работой башенных кранов. Число случаев смертельного травматизма, произошедших при эксплуатации башенных кранов, остается высоким и занимает лидирующие позиции в сравнении с другими типами кранов [1–3]. Таким образом, проведение исследования, направленного на повышение безопасности эксплуатации башенных кранов, является актуальным.

Вместе с тем при проведении ряда основных и вспомогательных операций башенным краном могут возникать потери времени. К таким операциям можно отнести строповку, расстроповку груза, а также его непосредственное перемещение и опускание. При этом очевидно, что чем больше потребуются точность перемещения груза, тем больше будут возрастать временные потери. Эти потери во многом обусловлены необходимостью обмена сообщениями между машинистом в кабине башенного крана и рабочим персоналом на площадке [4, 5]. Следовательно, возникновение проблемы связано с удаленным расположением оператора крана от места проведения погрузочно-разгрузочных работ.

На основании изложенного имеет смысл рассмотреть возможность применения дистанционного управления (далее ДУ) для повышения и безопасности, и эффективности погрузочно-разгрузочных работ с использованием башенного крана.

Результаты анализа состояния вопроса показывают, что к настоящему времени предпринимались попытки модернизации различных кранов путем установки на них систем ДУ [6–8]. В настоящее время существуют открытые коммерческие предложения по установке ДУ [9]. Однако большинство из них связаны с кранами мостового типа. При этом возможность применения ДУ для повышения безопасности и эффек-

тивности эксплуатации башенных кранов изучена не полностью. Данное наблюдение позволило определить вектор дальнейшего исследования.

Целью работы является разработка физической модели башенного крана на дистанционном управлении. Предполагаемая новизна исследования будет заключаться в разработке технологии дистанционного управления башенного крана, которая, в отличие от существующих, будет основываться на применении мобильного приложения, функционирующего на смартфоне, планшетном компьютере или аналогичном устройстве.

Материалы и методы исследования

Общей методологической основой исследования являлся системный подход, с учетом положений которого исследуемые процессы, объекты и явления рассматривались на системном уровне.

Для проведения аналитических исследований применялись системный анализ, синтез и математическое моделирование. Также аналитические исследования выполнялись на основании ранее выполненных исследований в направлении повышения безопасности и эффективности грузоподъемных машин циклического действия.

Разработка модели башенного крана осуществлялась в лаборатории кафедры транспортных и технологических систем Тюменского индустриального университета. Для моделирования ряда элементов было принято решение о необходимости использования специализированного конструкторского программного обеспечения SolidWorks.

Изготовление отдельных элементов башенного крана осуществлялось при помощи 3D-печати. Для изготовления этих элементов использовались оборудование, материалы и программное обеспечение (далее ПО), представленные в таблице.

Перечень материалов, оборудования и программного обеспечения
для моделирования элементов башенного крана

№ п/п	Тип оборудования, материала и ПО	Функциональное назначение	Марка, модель, наименование
1	3D-принтер	3D-печать, изготовление деталей	Kingroon Kp3S
2	Программное обеспечение для 3D-печати	Подготовка цифровых 3D-моделей к 3D-печати	PrusaSlicer
3	Полиэфирный пластик	Материал для 3D-печати	PLA, PLA+, PETG

**Результаты исследования
и их обсуждение**

На основании [4, 5] установлено, что общая продолжительность цикла работы башенного крана имеет вид

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + \dots + t_n = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (1)$$

где $T_{\text{ц}}$ – общая продолжительность цикла, с; t_i – время, затрачиваемое на реализацию i -й операции в цикле, с; n – количество операций в цикле.

При этом количество операций может варьироваться в пределах от 7 до 11 в зависимости от того, реализуются ли некоторые операции в совмещенном режиме [4, 5]. Совмещение операций позволяет сократить общую продолжительность цикла и, следовательно, повысить эффективность работы крана. Однако по результатам анализа ранее выполненных работ в полном объеме не было установлено влияние потерь времени, вызванных необходимостью передачи сигналов между оператором башенного крана и вспомогательным рабочим персоналом – стропальщиками. Для решения этой задачи представляется возможным представить общую продолжительность цикла работы башенного крана как функцию зависимости двух переменных:

$$T_{\text{ц}} = f\left(\sum_{i=1}^n t_i; t_L\right), \quad (2)$$

где t_L – потери времени, вызванные удаленным нахождением места работы башенного крана и необходимостью передачи сигналов рабочему персоналу, с.

Авторы предполагают, что функция (2) в дальнейшем может быть представлена линейной регрессионной моделью аддитивного вида с положительной корреляцией.

Вместе с этим удаленное расположение кабины башенного крана от земной поверхности неизбежно влечет за собой дополнительные временные потери на подъем и спуск оператора до места работы.

По действующему законодательству РФ данное время входит в общую продолжительность смены и оплачивается как полноценное рабочее время. С одной стороны, это безусловно справедливо по отношению к машинисту башенного крана. С другой стороны, данное время представляет собой простой грузоподъемной машины. Таким образом, продолжительность смены можно представить в виде двух составляющих:

$$T_{\text{см}} = T_{\text{см,ф}} + T_{\text{см,п}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{см}}$ – продолжительность смены, ч; $T_{\text{см,ф}}$ – соответственно фактическое (полезное) и потерянное время в общей продолжительности смены, ч.

В свою очередь, доля фактического времени работы башенного крана из общей продолжительности смены отображается в значении коэффициента использования грузоподъемной машины по времени:

$$k_B = T_{\text{см,ф}} / T_{\text{см}}. \quad (4)$$

Сопоставление формул (3) и (4) позволило с новой стороны интерпретировать значение коэффициента использования башенного крана по времени:

$$k_B = (T_{\text{см}} - T_{\text{см,п}}) / T_{\text{см}}. \quad (5)$$

Вместе с тем эксплуатационная сменная производительность будет определяться следующим образом:

$$П_{\text{см}} = T_{\text{см}} Q_{\Gamma} k_{\Gamma} k_B n, \quad (6)$$

где $П_{\text{см}}$ – эксплуатационная производительность башенного крана, т/смену; Q_{Γ} – максимальная грузоподъемность башенного крана, т; k_{Γ} – максимальная грузоподъемность башенного крана; n – количество целых значений циклов, которые можно реализовать за смену.

Сопоставив формулы (2), (4) и формулы (5) и (6), представляется возможным получить зависимость эксплуатационной производительности башенного крана от потерь времени, вызванных удаленным местонахождением рабочего места машиниста:

$$П_{\text{см}} = (T_{\text{см}} - T_{\text{см,п}}) Q_{\Gamma} k_{\Gamma} n(t_L). \quad (7)$$

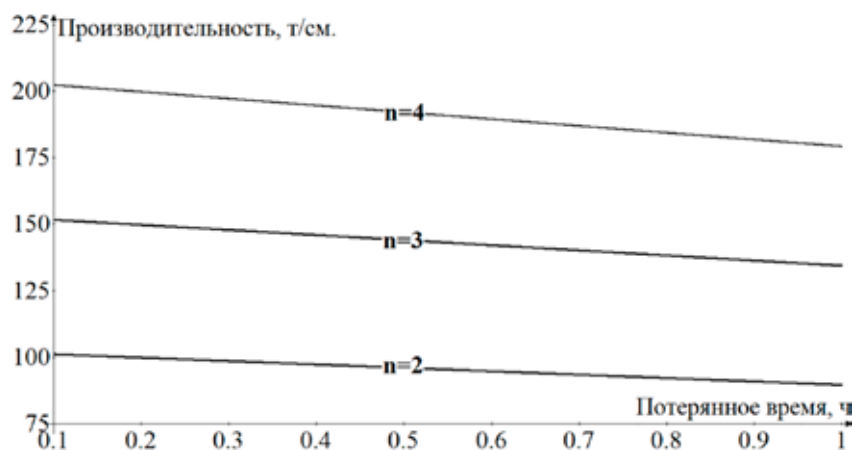


Рис. 2. Изменение эксплуатационной производительности башенного крана под влиянием потерь времени

Показатели, связанные с грузоподъемностью машин периодического действия, также являются важным фактором, влияющим на численное значение эксплуатационной производительности [4, 5]. Однако для корректного проведения дальнейших этапов исследования авторами было принято решение рассматривать данные показатели как постоянные величины (константы).

Процесс изменения эксплуатационной производительности башенного крана под влиянием потерь времени по причине удаленного местонахождения рабочего места оператора представлен на рис. 2.

Графическое построение модели исследуемого процесса (7) выполнялось для 8-часовой смены работы башенного крана максимальной грузоподъемности 8 т и коэффициентом использования грузоподъемности, равным 0,8. Анализируя результаты, представленные на рис. 2, следует отметить следующее. Даже при сокращении на 0,9 ч времени, затрачиваемого машинистом башенного крана на подъем в кабину и спуск из нее, ожидаемый эффект увеличения производительности может не состояться, если количество циклов уменьшится вследствие вырастания потерь времени, вызванных необходимостью обмена сообщениями между машинистом и вспомогательным рабочим персоналом в течение строповки и расстроповки груза.

По результатам аналитических исследований была сформулирована рабочая гипотеза: применение разрабатываемой системы дистанционного управления башенным краном позволит повысить его производительность за счет минимизации потерь времени, вызванных удаленным местонахождением рабочего места оператора.

Разработанная система дистанционным управлением башенным краном укрупненно

представлена в виде схемы на рис. 3. Общий принцип работы заключается в следующем. Для подачи сигналов на отдельные элементы башенного крана используется программное обеспечение, разработанное на языке Arduino в интегрированной программной среде Arduino IDE в виде мобильного приложения для операционной системы Android (рис. 4). При нажатии определенной клавиши в приложении происходит отправка сигнала на контроллер, установленный на башенном кране. Непосредственно сам сигнал передается посредством сети Wi-Fi и принимается Wi-Fi модулем контроллера. У контроллера имеются pin-разъемы для подключения управляемых механизмов башенного крана. У каждого pin-разъема имеется свой номер. Поэтому заблаговременно в программном коде также прописана взаимосвязь клавиши управления тем или иным механизмом башенного крана и pin-разъема, куда он подключается. После перенаправления сигнала на указанный pin-разъем сигнал предварительно поступает на плату-драйвер, установленную на входе каждого управляемого элемента. На каждой плате-драйвере также имеются собственные разъемы, которые связаны с запуском и остановкой вращения моторов в прямом или обратном направлении.

Для тестирования предлагаемой на рис. 3 системы было принято решение о необходимости ее предварительного тестирования на физической модели объекта. Результаты моделирования башенного крана представлены на рис. 5.

В качестве примера на рис. 5, а, также представлена 3D-модель редуктора в сборе, включая корпус, валы и втулки. Данный элемент установлен на модель башенного крана (рис. 5, б) и используется по своему назначению в полном объеме.

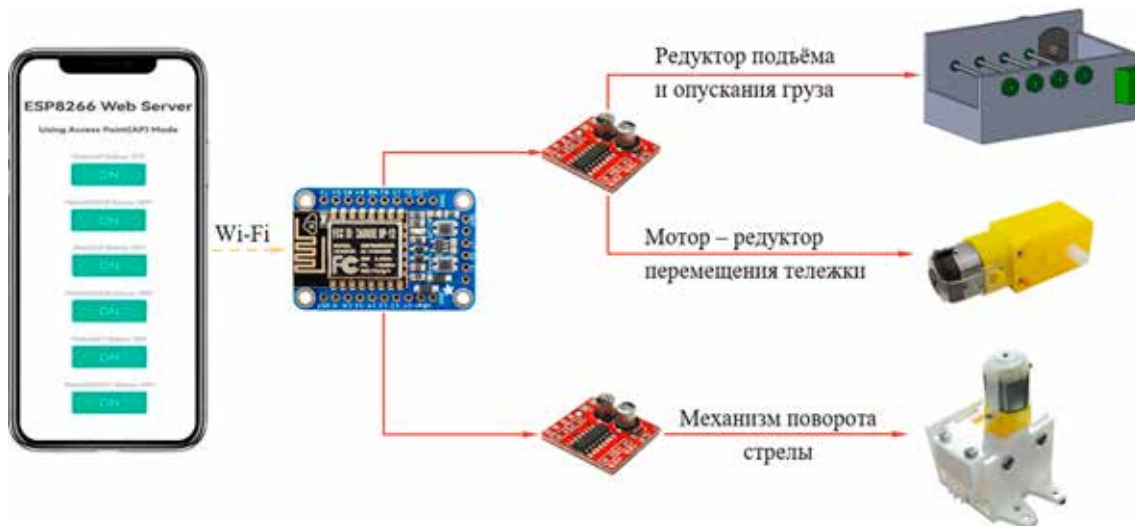


Рис. 3. Схема дистанционной системы управления башенным краном

```

sketch_jun21a | Arduino IDE 2.1.0
File Edit Sketch Tools Help
Select Board

sketch_jun21a.ino
1 #include <ESP8266WiFi.h>
2 #include <WiFiClient.h>
3 #include <ESP8266WebServer.h>
4
5 //SSID and Password to your ESP Access Point
6 const char* ssid = "ESPWebServer";
7 const char* password = "123456789";
8
9 IPAddress ip(192,168,1,17);
10 IPAddress gateway(192,168,1,1);
11 IPAddress subnet(255,255,255,0);
12
13 ESP8266WebServer server(80); //Server on port 80
14
15 void handleRoot() {
16   server.send(200, "text/plain", "hello from esp8266!");
17 }
18
19 #define motorUP 15
20 boolean motorUP_status = 0;
21
22 #define motorDOWN 13
23 boolean motorDOWN_status = 0;
24
25 #define motorUP1 4
26 boolean motorUP1_status = 0;
27
28 #define motorDOWN1 20
29 boolean motorDOWN1_status = 0;
30
31 #define motorUP2 21
32 boolean motorUP2_status = 0;
33
34 #define motorDOWN2 22
35 boolean motorDOWN2_status = 0;
  
```

Рис. 4. Фрагмент программного кода системы дистанционного управления башенным краном в программной среде Arduino IDE

В настоящее время разработанная система успешно функционирует на физической модели башенного крана, что открывает дальнейшие перспективы по совершенствованию реального объекта.

Предложенный принцип работы ДУ, в отличие от существующих, реализуется в про-

стом и удобном мобильном приложении, которое разработано на open source платформах и функционирует в любом смартфоне, планшете или подобном устройстве на операционной системе Android.



а) 3D-модель корпуса редуктора в сборе



б) модель башенного крана в сборе

Рис. 5. Результаты разработки модели башенного крана

Поскольку разработанное приложение реализовано на основе открытого программного кода, дополнительным преиму-

ществом предлагаемой системы является возможность занесения заранее подготовленных алгоритмов работы башенного крана, что в дальнейшем позволит увеличить долю грузоподъемных операций в автоматизированном режиме.

В первую очередь авторы определяют предполагаемый эффект от внедрения результатов исследования как социальный. Он заключается в минимизации рисков получения травм различной степени тяжести и летального исхода машиниста в случае падения башенного крана. Достижение данного эффекта возможно посредством полного исключения нахождения оператора башенного крана на высоте.

Предполагаемый технологический эффект заключается в увеличении сменной эксплуатационной производительности башенного крана и может достигаться посредством сокращения общей продолжительности цикла и уменьшения времени простоя башенного крана. Среднее значение прироста производительности за одну рабочую смену может достигать 17%.

С точки зрения авторов, экономический эффект от применения результатов исследования формируется вследствие сокращения времени простоя башенного крана, уменьшения коэффициента страховых выплат по классу опасности и снижения компенсации страховых выплат за полученные травмы и летальный исход, которые ранее выплачивались в случае падения башенного крана. По предварительной аналитической оценке, экономический эффект составит приблизительно 740 тыс. руб. за один календарный год на каждую единицу техники. Экономические затраты, связанные с закупкой необходимых материалов и переоборудованием реального прототипа башенного крана, составят примерно 270 тыс. руб. Срок окупаемости при этом составит приблизительно 5 календарных месяцев.

Заключение

По результатам выполнения исследования было установлено, что в настоящее время по-прежнему актуальной остается проблема повышения безопасности и эффективности работы грузоподъемных машин. Особенно это проявляется в части эксплуатации башенных кранов.

Установлено, что во многом эта проблема связана с удаленным местонахождением рабочего места оператора крана. С одной стороны, это формирует риск получения травмы или летального исхода в случае падения крана, с другой – снижает эксплуатационную производительность вследствие временных потерь на подъем и спуск крановщика.

Решение данной проблемы авторы видят в необходимости исключения нахождения оператора башенного крана на опасной высоте. Для этого авторами была спроектирована система дистанционного управления башенным краном. Предлагаемое решение, в отличие от существующих аналогов, реализовано в виде мобильного приложения на операционной системе Android с использованием передачи сигнала по Wi-Fi. Для тестирования системы дистанционного управления была разработана физическая модель башенного крана. Проектирование элементов башенного крана осуществлялось с использованием программного комплекса SolidWorks, а изготовление элементов – посредством применения принтера 3D-печати.

Применение результатов исследования на реальном объекте позволит не только снизить риски получения травм и летального исхода, но и повысит эксплуатационную производительность башенного крана. Предполагаемый экономический эффект при этом составит приблизительно 740 тыс. руб. за один календарный год на одну единицу техники. С учетом экономических затрат, связанных с закупкой необходимых материалов и выполнения работ по переоборудованию реального прототипа башенного крана, срок окупаемости предлагаемых решений составит не более 5 календарных месяцев.

Список литературы

1. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2021 году // Ростехнадзор: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору URL: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 27.03.2023).
2. Sharmanov V.V., Mamaev A.E., Simankina T.L., Braila N.V., Romanovich M.A. Express monitoring of technical condition of tower crane on the basis of integral-differential approach // Bulletin of Civil Engineers. 2020. № 2 (79). P. 123–131.
3. Goldobina L.A., Demenkov P.A., Trushko O.V. Ensuring the Safety of Construction Works During the Erection of Buildings and Structures // Journal of Mining Institute. 2019. № 239. P. 583–595.
4. Арефьев Е.М., Матвиенко С.А. Исследование влияния основных технических характеристик башенного крана на средневзвешенную длительность цикла перемещения груза // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2020. № 3 (70). С. 3–11.
5. Малев А.А. Оптимизация подбора башенного крана путем построения номограммы производительности // Молодой ученый. 2019. № 21 (259). С. 43–146.
6. Сегаев И.Н., Репников М.С., Смирнова Ю.О. Анализ современных технических и технологических решений в строительстве // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 12 (2). С. 357–361.
7. Слуцкий А.В., Шишков Н.А. Радиоэлектронные средства дистанционного управления грузоподъемными кранами // Безопасность труда в промышленности. 2002. № 7. С. 28–30.
8. Беляев С.Л. Технологии дистанционного управления в строительстве // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. № 2. С. 156–165.