 © Авторы статьи / Authors of the article

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА/TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.3 EDN: BSHHAG

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА УКЛАДКИ ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКИ

Научная статья

Калиниченко С.В.[1,] *, Польский В.А.[2], Гуляев И.А.[3]

[1, 2, 3] Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kln-sv777[at]yandex.ru)

Предложена: 28.09.2026; Принята: 13.11.2026; Опубликована: 20.11.2026

Аннотация

Проведен анализ современного состояния технических систем по автоматизации укладки тротуарной плитки. Предложена концепция построения мобильного робототехнического комплекса, предназначенного для укладки тротуарной плитки, оснащенного специальным манипулятором, который имеет четыре линейных степени подвижности и одну вращательную степень подвижности. Для удержания плитки используется вакуумный захват. Разработан алгоритм работы манипулятора. Показано, что предложенное компоновочное решение позволяет проводить укладку плитки при движении комплекса в прямом и обратном направлении, а также увеличить количество укладываемой плитки без дополнительной загрузки комплекса. Выполнен энергетический расчет и моделирование наиболее нагруженного привода манипулятора.

Ключевые слова: автоматизация, робототехнический комплекс, манипулятор, электропривод, укладка тротуарной плитки.

CONCEPT FOR THE CONSTRUCTION OF A ROBOTISED PAVING SLAB LAYING COMPLEX

Research article

Kalinichenko S.V.[1,] *, Polskii V.A.[2], Gulyaev I.A.[3]

[1, 2, 3] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (kln-sv777[at]yandex.ru)

Suggested: 28.09.2026; Accepted: 13.11.2026; Published: 20.11.2026

Abstract

An analysis has been carried out of the current state of technical systems for the automated laying of paving slabs. A concept has been suggested for the construction of a mobile robotic system designed for laying paving slabs, equipped with a specialised manipulator with four linear degrees of mobility and one rotational degree of mobility. A vacuum gripper is used to hold the slabs. An algorithm for the manipulator's operation has been developed. It is demonstrated that the proposed configuration allows for the laying of paving slabs while the system moves forwards and backwards, as well as increasing the number of slabs laid without the need for additional loading of the system. A power calculation and simulation of the manipulator's most heavily loaded drive have been carried out.

Keywords: automation, robotic system, manipulator, electric drive, paving slab laying.

Введение

В настоящее время роботизация строительной отрасли в России является одним из перспективных направлений с точки зрения реализации различных технологических инноваций, а также роста производительности труда, однако пока находится в начальной стадии [1]. В многих странах мира разрабатывается большое количество разнообразных робототехнических решений, охватывающих самые разные области строительных технологий, но примеров практического внедрения пока не так много [2], [3].

В настоящее время для мощения пешеходных зон, тротуаров, дворовых территорий во многих городах России используется тротуарная плитка, имеющая различную технологию изготовления, размеры, форму и цвет. При этом укладка плитки производится в основном вручную.

Создание прототипа робототехнического комплекса для укладки тротуарной плитки - это комплексная задача, требующая междисциплинарного подхода, включающего механику, электронику, программное обеспечение, компьютерное зрение и некоторые другие области знаний.

При этом мы выделяем следующие возникающие основные научные и технические проблемы:

- обоснование построения шасси и конструкции манипулятора;
- обоснование рациональной конструкции захватного устройства, способного удерживать плитку различных габаритов и массы в процессе укладки и перемещения;
- построение системы управления и сенсорной системы, в реальном времени обеспечивающих ориентацию и контроль качества укладки, в том числе равномерные зазоры между плитками.

В этой статье авторы рассматривают концепцию построения шасси комплекса и манипулятора.

Проблемой автоматизации укладки тротуарной плитки занимались на протяжении почти 60 лет [4], [5], однако к настоящему времени на рынке представлены управляемые человеком машины-погрузчики, оборудованные

 © Авторы статьи / Authors of the article

специальными захватами-зажимами (рис. 1), позволяющими укладывать заранее сформированный пакет тротуарной плитки на подготовленное основание (рис. 2) [6], [7].



Рисунок 1 - Средства механизации процесса укладки пакета тротуарной плитки
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.3.1



Рисунок 2 - Средства механизации процесса укладки пакета тротуарной плитки
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.3.2

Также известна разработка компании «Vanku»(Нидерланды) [8] — машина на гусеничном ходу для укладки брусчатки «Tiger Stone», работу которой обеспечивают два–три человека, укладывающих в нужной ориентации отдельные камни из бункера в наклонный приемник.

С точки зрения компаний, занимающихся проведением дорожных работ, представляет интерес автоматизация укладки плитки, имеющей большие размеры, как, например, квадратные со стороной 400–600 мм, высотой от 50 до 80 мм и соответственно вес от 20 до 70 кг, используемые при благоустройстве больших участков: парковых площадей, паркингов, территорий АЗС и др.

Описание роботизированного комплекса укладки тротуарной плитки

Трехмерная модель прототипа мобильного робота с бортовым манипулятором для укладки тротуарной плитки больших размеров представлена на рисунке 3. Габаритные размеры комплекса определяются размерами плитки 500х500х50 мм. Предполагается, что процесс роботизированной укладки предусматривает подготовленную, выровненную поверхность. Учитывая большой вес одной плитки, предлагается ее поштучная укладка манипулятором ортогональной схемы, который размещается на мобильной платформе с гусеничным движителем. Для повышения производительности предлагается установить на платформу две паллеты с укладываемой плиткой с каждой стороны. Удержание плитки осуществляется вакуумным захватом из нескольких присосок, разряжение в которых создается эжекторами.

 © Авторы статьи / Authors of the article

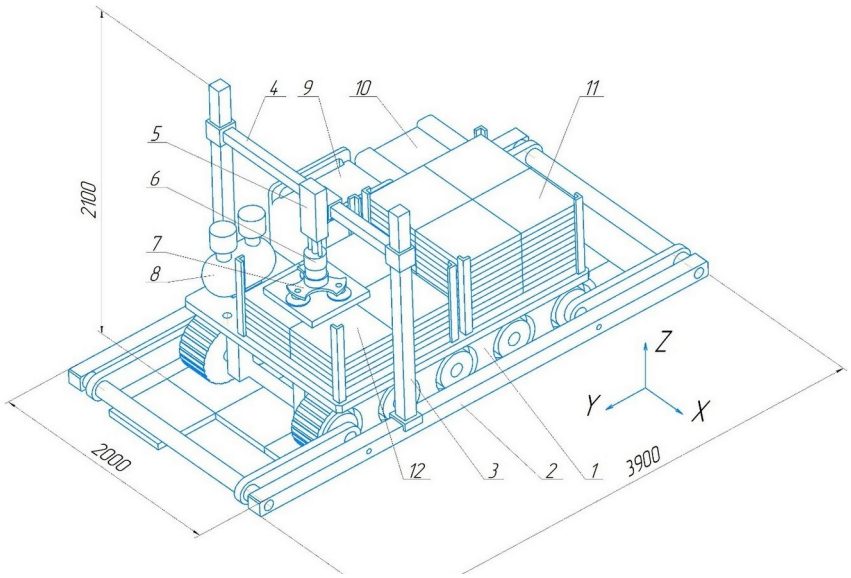


Рисунок 3 - Трехмерная модель робототехнического комплекса укладки тротуарной плитки

DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.3.3

Примечание: 1 – гусеничное шасси; 2 – механизм продольного движения манипулятора (по оси Y); 3 – механизм вертикального перемещения манипулятора (по оси Z); 4 – механизм поперечного перемещения манипулятора (по оси X); 5 – дополнительный механизм прецизионного вертикального перемещения захватного устройства манипулятора по оси Z; 6 – механизм ротации захватного устройства манипулятора относительно оси Z; 7 – вакуумное захватное устройство; 8 – пневматический компрессор; 9 – бензиновый генератор 380/220 В; 10 – бортовой блок управления; 11 – палета с плиткой (задняя); 12 – палета с плиткой (передняя)

Предполагается, что РТК укладывает плитку перед собой на ширину, достаточную для его дальнейшего продвижения непосредственно по уложенной поверхности.

В предлагаемой концепции РТК предусмотрено несимметричное расположение паллет с плиткой относительно корпуса шасси. Это связано с необходимостью размещения вспомогательного оборудования, обеспечивающего работу комплекса. В состав этого оборудования входят:

бензиновый электрогенератор на напряжение 380/220 В, воздушный компрессор на давление 8 бар, бортовой блок питания и управления. Компрессор используется для подачи сжатого воздуха для питания эжекторов вакуумного захватного устройства, и возможно для пневматического привода вертикального перемещения манипулятора.

Кроме того такое расположение паллет позволяет увеличить их количество до двух, обеспечить их загрузку с трех сторон, а также позволяет производить укладку плитки в прямом и обратном направлении движения транспортной платформы без ее разворота на 360 градусов.

Бортовой манипулятор, показанный на рис. 3, имеет четыре линейных степени подвижности (поз. 2–5) и одну вращательную (поз. 6). Причем степень подвижности вертикального перемещения захватного устройства манипулятора является составной и состоит из двух приводов: основного привода (поз. 3) и дополнительного прецизионного привода (поз. 5). Предполагается, что для всех вышерассмотренных степеней подвижности могут быть использованы сервоприводы на базе бесколлекторных двигателей постоянного тока, но также возможно использовать в качестве основного привода вертикального перемещения (поз. 3) пневматический цилиндр.

Бортовой манипулятор должен работать в позиционном режиме, при этом бортовой блок управления (поз.10) рассчитывает для каждого привода требуемое перемещение, которое реализуется с трапецеидальным профилем изменения скорости.

2.1. Алгоритм работы манипулятора РТК

Ниже приводится алгоритм работы приводов отдельных степеней подвижности манипулятора начиная с момента, когда плитка захвачена с помощью вакуумного захватного устройства (7) и расчет производительности комплекса:

1. Подъем плитки на высоту транспортирования с помощью основного привода вертикального перемещения (поз. 3); Z_1=0,45 м; t_1=0,65+1= 1,65 с;

2. Перемещение плитки в горизонтальной плоскости с помощью приводов продольного и поперечного перемещения (поз. 1 и 4), при этом приводы работают одновременно; Y_1=2,7 м; X_1=1м; t_2=2,9+1= 3,9 с;

3. Предварительное опускание плитки с помощью основного привода вертикального перемещения (поз. 3); Z_2= - 1,25м; t_3=1,45+1= 2,45 с;

4. Точная угловая ориентация плитки с помощью привода ротации захватного устройства (поз. 6); t_4=0,5+1= 1,5 с;

5. Окончательное опускание плитки на поверхность с помощью дополнительного прецизионного привода (поз. 5); Z_3= - 0,28м; t_5=0,48с.

Движение на исходную позицию для захвата новой плитки: примем 9,98 с.

Таким образом, для укладки одной плитки требуется 9,98*2=19,96 с.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Схема укладки двух рядов плитки. В каждом ряду укладывается по 3 плитки, что позволяет роботу продвинуться вперед по уже уложенной плитке. После чего он должен продвинуться вперед на 1 метр, чтобы укладывать следующие 2 ряда.

Для укладки двух рядов плитки потребуется время: 19,96*6 = 120 с.

Примем время для переезда робота на 1 метр = 2 с.

Тогда для укладки двух рядов плитки и для переезда на новую позицию потребуется: 120 + 2 = 122 с.

На борту робота находятся 2 поддона по 36 плиток на каждом, то есть 72 плитки. Тогда для укладки всех 72 плиток потребуется: 122*12 = 1464 с. (24,4 мин).

Площадь уложенной плитки составит: 72*0,25 = 18 м^2.

Для дальнейшей работы робота на него надо загрузить 2 новые паллеты.

Эту операцию может выполнить:

- вилочный погрузчик;
- подъемный кран;
- специальная заряжающая машина.

Ориентировочно примем время, необходимое для выполнения данной операции 5 мин.

Тогда для укладки 108 м^2 плитки потребуется: (24,4 + 5)*6 = 176,4 мин, то есть порядка 3 часов.

Числовые значения вышеуказанных перемещений (Z_1, Z_2, Z_3, Y_1, X_1) определены исходя из габаритных размеров РТК (рис. 3), причем перемещение Y_1 взято максимальным и соответствует случаю, когда манипулятор захватывает плитку с задней паллеты (поз. 11 на рис. 3) и переносит ее вперед по ходу движения мобильной платформы. При расчете временных интервалов задавалась максимальная скорость движения всех линейных приводов $V_{макс}$ = 1 м/с и ускорение $a_{макс}$ = 5 м/с^2. При этом после окончания каждого движения и до начала следующего выполняется временная выдержка в 1 с, для успокоения упругих колебаний.

В рассматриваемой концепции РТК (рис.3), наибольшую длину хода имеет привод продольного движения (поз.2), который реализуется на базе реечной передачи, и он же является самым нагруженным, так как перемещает все узлы манипулятора и укладываемую плитку. Предварительные расчеты показали, что ориентировочная суммарная масса всех элементов составит $m_{сум}$ = 115 кг, однако для дальнейших расчетов примем (с запасом) $m_{сум}$ = 200 кг.

2.1.1. Расчетные исследования и моделирование

Оценим мощность привода (P) механизма продольного движения: $P = (F_{ст} + a_{макс} \cdot m_{сум} \cdot K_{дин}) \cdot V_{макс} + P_{рот}$;

Здесь: $F_{ст}$ — сила сухого трения: $F_{ст} = m_{сум} \cdot g \cdot f_{тр}$,

где g = 9,81 м/с2 — ускорение свободного падения;

$f_{тр}$ — коэффициент силы сухого трения. Обычно для передач $f_{тр}$ принимают равным 0,06 ...0,07, для случаев эксплуатации в сложных условиях до 0,12. Примем $f_{тр}$ = 0,1;

$a_{макс}$ — максимальное ускорение, примем $a_{макс}$ = 5 м/с^2;

$K_{дин}$ — динамический коэффициент, учитывающий упругие колебания системы. Для нашего случая примем $K_{дин}$ = 2, исходя из рекомендаций изложенных в [6].

$V_{макс}$ — максимальная скорость перемещения. Примем $V_{макс}$ = 1 м/с. $P_{рот}$ — ориентировочная мощность, необходимая для разгона ротора двигателя. Примем $P_{рот} = a_{макс} \cdot m_{сум} \cdot V_{макс}$, то есть мощность, необходимая для разгона ротора, равна мощности, необходимой для разгона подвижных частей привода.

Тогда получим: $P = (200 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}1 + 5 \cdot 200 \cdot 2) \cdot 1 + 1000 \approx 3196$ Вт.

С учетом КПД = 0,85 получим P= 3196/0,85 = 3760 Вт.

Для данного привода предлагается использовать синхронный серводвигатель марки 150S3TB-M15025 производства компании «Leadshine Technology» (КНР), оснащенный энкодером и тормозом и имеющий следующие паспортные данные:

– номинальная мощность: $P_{ном}$=3.8 кВт;
– максимальная мощность: $P_{макс}$=5.7 кВт;
– номинальное напряжение: $U_{ном}$=380 В;
– номинальный ток: $I_{ном}$ = 9,5 А;
– максимальный ток: $I_{макс}$ = 14,25 А;
– номинальная скорость: $n_{ном}$=2500 об/мин (ω ≈ 262 рад/с);
– номинальный момент: $M_{ном}$=15 Нм;
– максимальный момент: $M_{макс}$=22,5 Нм;
– вес: 15.2 кг.

Тогда при радиусе шестерни $R_ш$ = 50 мм = 0,05 м, модуль которой m=4 мм, с числом зубьев z=25, и для обеспечения скорости движения V = 1м/с понадобится дополнительный редуктор с передаточным числом: $i = \omega_{дв} * R_ш / V$ = 262 * 0,05 / 1 = 13,1.

Было выполнено моделирование привода механизма продольного движения в программном пакете Matlab Simulink [9]. Сервопривод рассматривался в виде классической трехконтурной схемы подчиненного регулирования [10] с контурами тока, скорости и положения.

В качестве датчиков обратных связей используются: датчик тока, датчик скорости (установлен на валу двигателя) и датчик положения (установлен на выходном валу редуктора).

В модели учитывается упругость механической передачи от двигателя к нагрузке. Модель двухмассовой системы представлена согласно [11].

Контур тока настроен на полосу пропускания 398 Гц, контур скорости настроен на полосу пропускания 100 Гц, контур положения настроен на полосу пропускания 5 Гц.

 © Авторы статьи / Authors of the article

В ходе моделирования задавалось тестовое перемещение механизма продольного движения на 1 м со скоростью 1 м/с и с ускорением 5 м/с^2, при этом задавался трапецеидальный профиль изменения скорости.

Ниже на рисунках 4,5,6 представлены некоторые результаты моделирования.

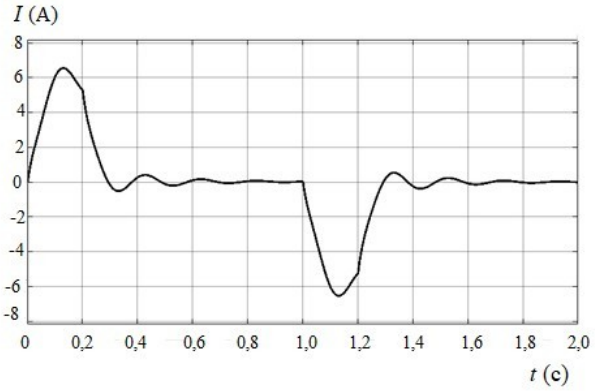


Рисунок 4 - График изменения тока в обмотках двигателя
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.3.4

Как видно из рисунка 4, максимальное значение тока (6,5 А) меньше номинального значения (9,5 А). Затухающие колебания тока с частотой 5 Гц обусловлены упругими колебаниями нагрузки. Это означает, что для полного затухания упругих колебаний перед началом нового движения (опускание плитки с помощью механизма вертикального перемещения) необходимо выдержать временную паузу порядка 1 с.

На рис. 5 показан график изменения частоты вращения ω вала двигателя, из которого следует, что максимальное значение скорости (265 рад/с) равно номинальному значению.

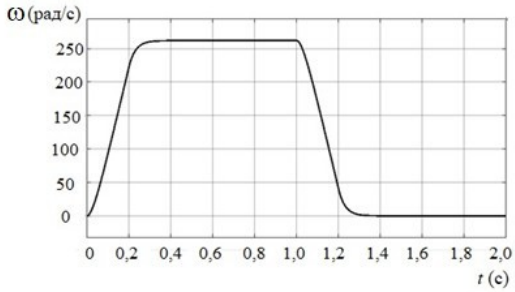


Рисунок 5 - График изменения частоты вращения ω вала двигателя
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.3.5

На рисунке 6 представлен график ошибки между заданным и фактическим положением привода продольного движения.

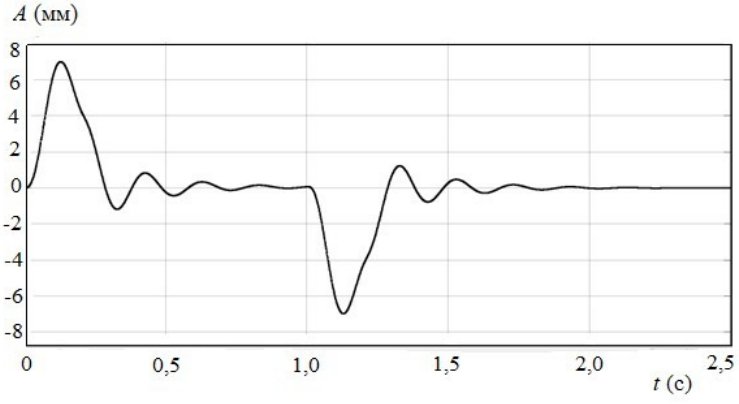


Рисунок 6 - График ошибки А между заданным и фактическим перемещением привода продольного движения
DOI: https://doi.org/10.60797/mca.2026.78.3.6

 © Авторы статьи / Authors of the article

Как видно из рисунка 6, величина максимальной динамической ошибки не превышает 7 мм.

Заключение

Предложенная концепция построения мобильного РТК укладки тротуарной плитки, оснащенного манипулятором с пятью степенями подвижности с указанными в статье параметрами, позволяет, как показали предварительные расчеты, уложить 100 м^2 плитки примерно за 3 часа.

Результаты разработки вакуумного захватного устройства для различных условий эксплуатации, как и обеспечение точного позиционирования плитки перед непосредственно укладкой - это тема для отдельного исследования и выходит за рамки настоящей статьи, тем не менее предполагается, что для ориентации будет использоваться система лазерных указателей, а разряжение в захватах создаваться системой эжекторов.

В дальнейшем планируется развивать проект, уделяя особое внимание построению системы управления комплексом, в том числе разделению функций между оператором и машиной, а также техническим решениям, позволяющим проводить точное позиционирование плитки перед укладкой.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Малолетов А.В. Перспективы роботизации строительной отрасли / А.В. Малолетов // Kazan Digital Week — 2023 : сборник материалов Международного форума. — Казань, 2023. — С. 567–575.

2. Сугиров Д.У. Перспективные инновационные технологии в строительстве / Д.У. Сугиров // Современные научные исследования и инновации. — 2023. — № 1. — URL: https://web.snauka.ru/issues/2023/01/99730 (дата обращения: 09.09.2026).

3. Ермолаева М.Б. Опыт Китайской Народной Республики в области интеллектуализации инвестиционно-строительной деятельности / М.Б. Ермолаева // Управление проектами и недвижимостью: современные тренды : материалы студенческого круглого стола в рамках XVI Международной научно-практической конференции «Современные проблемы управления проектами в инвестиционно-строительной сфере и природопользовании», посвященной 30-летию базовой кафедры «Управление проектами и программами Капитал Груп». — Москва, 2026. — С. 133–138.

4. Машина для укладки тротуарной плитки : а.с. 1007970 СССР: МПК E01C / В.М. Ревзин (СССР). — № 1177762/29-14; заявл. 03.08.67; опубл. 22.09.67, Бюл. № 29. — 3 с.

5. Агрегат для укладки тротуарных плиток : пат. 2740596 Рос. Федерация: МПК E01C19/52 / Николаев В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». — № 2020124048; заявл. 13.07.20; опубл. 15.01.21, Бюл. № 2. — 26 с.

6. Габдуллин Т.Р. Совершенствование способа укладки тротуарной плитки / Т.Р. Габдуллин, Р.Ф. Кашипов // Известия КГАСУ. — 2019. — № 1(47). — С. 250–257.

7. Поезжаева Е.В. Автоматизированная укладка дорожных плит / Е.В. Поезжаева [и др.] // Технические науки — от теории к практике : материалы XVI Международной заочной научно-практической конференции. — Новосибирск, 2012. — № 16. — С. 14–21.

8. Куимов Е.А. Механизированная укладка тротуарной плитки с помощью автоматизированного оборудования / Е.А. Куимов, П.Н. Черемисинов // Общество, наука, инновации (НПК–2015): Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция : сборник материалов, 13–24 апреля 2015 г. / Вятский государственный университет. — Киров, 2015. — С. 665–666.

9. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. — СПб. : Корона-Век, 2008. — 368 с.

10. Терехов В.М. Система управления электроприводов : учебник для студентов высших учебных заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов. — 2-е изд., стер. — Москва : Академия, 2006. — 304 с.

11. Кувшинов А.А. Теория электропривода. Часть 3: Переходные процессы в электроприводе : учебное пособие / А.А. Кувшинов, Э.Л. Греков. — Оренбург : ОГУ, 2017. — 114 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Maloletov A.V. Perspektivy robotizatsii stroitel'noy otrasli [Prospects for robotization of the construction industry] / A.V. Maloletov // Kazan Digital Week — 2023 [Kazan Digital Week — 2023] : collection of materials of the International Forum. — Kazan, 2023. — P. 567–575. [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

2. Sugirov D.U. Perspektivnyye innovatsionnyye tekhnologii v stroitel'stve [Promising innovative technologies in construction] / D.U. Sugirov // Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii [Modern Scientific Research and Innovations]. — 2023. — № 1. — URL: https://web.snauka.ru/issues/2023/01/99730 (accessed: 09.09.2026). [in Russian]

3. Ermolaeva M.B. Opyt Kitayskoy Narodnoy Respubliki v oblasti intellektualizatsii investitsionno-stroitel'noy deyatel'nosti [The experience of the People's Republic of China in the intellectualization of investment and construction activities] / M.B. Ermolaeva // Upravleniye proyektami i nedvizhimost'yu: sovremennyye trendy [Project and Real Estate Management: Modern Trends] : materials of the student round table within the framework of the XVI International Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Project Management in the Investment and Construction Sphere and Environmental Management", dedicated to the 30th anniversary of the basic department "Project and Program Management of Capital Group". — Moscow, 2026. — P. 133–138. [in Russian]

4. Mashina dlya ukladki trotuarnoy plitki [Machine for laying paving slabs] : author's certificate 1007970 USSR : IPC E01C / V.M. Revzin (USSR). — № 1177762/29-14 ; filed 03.08.67 ; published 22.09.67, Bulletin № 29. — 3 p. [in Russian]

5. Agregat dlya ukladki trotuarnykh plitok [Unit for laying paving slabs] : patent 2740596 Russian Federation : IPC E01C19/52 / Nikolaev V.A. ; applicant and patent holder FSBEI HE "Yaroslavl State Technical University". — № 2020124048 ; filed 13.07.20 ; published 15.01.21, Bulletin № 2. — 26 p. [in Russian]

6. Gabdullin T.R. Sovershenstvovaniye sposoba ukladki trotuarnoy plitki [Improvement of the method of laying paving slabs] / T.R. Gabdullin, R.F. Kashipov // Izvestiya KGASU [News of KSUAE]. — 2019. — № 1(47). — P. 250–257. [in Russian]

7. Poezzhaeva E.V. Avtomatizirovannaya ukladka dorozhnykh plit [Automated laying of road slabs] / E.V. Poezzhaeva [et al.] // Tekhnicheskiye nauki — ot teorii k praktike [Technical Sciences — from Theory to Practice] : proceedings of the XVI International Correspondence Scientific and Practical Conference. — Novosibirsk, 2012. — № 16. — P. 14–21. [in Russian]

8. Kuimov E.A. Mekhanizirovannaya ukladka trotuarnoy plitki s pomoshch'yu avtomatizirovannogo oborudovaniya [Mechanized laying of paving slabs using automated equipment] / E.A. Kuimov, P.N. Cheremisinov // Obshchestvo, nauka, innovatsii (NPK–2015) [Society, Science, Innovations (SPC–2015)] : All-Russian Annual Scientific and Practical Conference : collection of materials, April 13–24, 2015 / Vyatka State University. — Kirov, 2015. — P. 665–666. [in Russian]

9. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Proyektirovaniye mekhatronnykh sistem na PK [Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems on a PC] / S.G. German-Galkin. — St. Petersburg : Korona-Vek, 2008. — 368 p. [in Russian]

10. Terekhov V.M. Sistema upravleniya elektroprivodov [Electric drive control system] : textbook for students of higher educational institutions / V.M. Terekhov, O.I. Osipov. — 2nd ed., ster. — Moscow : Akademiya, 2006. — 304 p. [in Russian]

11. Kuvshinov A.A. Teoriya elektroprivoda. Chast' 3: Perekhodnyye protsessy v elektroprivode [Theory of electric drive. Part 3: Transient processes in the electric drive] : textbook / A.A. Kuvshinov, E.L. Grekov. — Orenburg : OSU, 2017. — 114 p. [in Russian]