

М. С. Бабаев¹, Я. В. Калинин²

**ТРОСОВЫЙ РОБОТ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ОБСЛУЖИВАНИЯ
ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

¹ Волгоградский государственный технический университет

² Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова
jkv83@mail.ru

В работе дается обзор современного состояния строительной отрасли в плане роботизации рутинных, сложных и опасных для человека технологических операций.

Ключевые слова: строительство, робот для строительства, мониторинг зданий и сооружений.

M. S. Babaev¹, Ya. V. Kalinin²

ROBOT FOR BUILDING REVIEW

¹ Volgograd State Technical University

² The Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute

The work provides an overview of the current state of the construction industry in terms of robotization of routine, complex and dangerous technological operations for humans.

Keywords: building, robot for building, monitoring of buildings and structures.

Строительная отрасль по-прежнему является одновременно одной из самых трудоемких, но наименее автоматизированных и роботизированных отраслей промышленности. Самая тяжелая и опасная работа, как и ранее, остается в руках людей, несмотря на быстрое развитие автоматизации и робототехники. При возведении и обслуживании зданий и сооружений, особенно высотных, возникает ряд специфических проблем, из-за которых автоматизация усложняется. Автоматизированные роботизированные системы отлично справляются с повторяющимися задачами в узком диапазоне вариативности, строительные работы же, напротив, многообразны и непредсказуемы, нуждаются в привлечении на место работ разных специалистов на протяжении всего процесса. Отдельно следует отметить и внешние факторы, такие как погода и ландшафт, которые могут меняться в любой момент, и также привносят специфические проблемы и особенности.

Актуальной проблемой в большинстве стран мира является производственный травматизм как следствие несчастных случаев и аварий.

Охрана труда в строительстве – это взаимосвязь социально-экономических, законодательных, технических, гигиенических и организационных мероприятий. Основной ее целью является ограждение здоровья строителей от несчастных случаев и профессиональных заболеваний, а также обеспечение благоприятных условий труда для повышения производительности и качества выполняемых работ. Крайне важными работами являются высотные работы, связанные со строительством, ремонтом, мониторингом и обслуживанием высотных зданий и сооружений. При этом, если строительные работы считаются сложными как сами по себе, так и в плане автоматизации и роботизации, то работы, связанные с мониторингом, обслуживанием и мелким ремонтом высотных зданий и сооружений, вполне могут быть роботизированы, как за счет их меньшей сложности и вариативности, так и за счет того, что на готовом здании можно заложить, в том числе на этапе строительства, вспомогательные устройства и оборудование для использования простых и надежных роботов вертикального перемещения.

В настоящее время различными научными коллективами широко исследуются способы перемещения роботов по вертикальным поверхностям.

Изучаются способы перемещения при помощи вакуумных фиксаторов [1] и магнитных захватов [2]. Активно развивается направление, изучающее перемещение роботов с механическими и адгезионными захватами [3].

В то же время известны и также широко исследуются способы перемещения при помощи тросовых движителей [4, 5].

Предложен алгоритм решения задачи статического равновесия квазистатических шагающих роботов с любым количеством тросов и опор [5].

Роботы, использующие вакуумные фиксаторы [1], могут работать на ровных, сплошных поверхностях с низкой шероховатостью, так как разрывы на поверхности, неровности и другие дефекты не позволяют надежно зафиксировать опоры. Таким образом, подобные роботы чувствительны к типу опорной поверхности. Роботы с магнитными фиксаторами [2] также имеют ограниченный круг применения, прежде всего на магнитных поверхностях. Также недостатком большинства роботов данного типа является необходимость затраты энергии в процессе удержания робота на вертикальной поверхности (затраты на поддержание вакуума и электромагнитного поля).

Роботы с механическими захватами требуют наличия регулярных неровностей на вертикальной поверхности, на которые они смогут опираться, а также имеют сложную систему управления. Роботы с адгезионными захватами [3, 6] кажутся наиболее универсальными, но разработанные на данный момент адгезионные захваты в процессе использования быстро изнашиваются и теряют свои свойства, в первую очередь понижается их несущая способность.

Роботы, использующие тросовые движители [4–6], обычно рассматриваются как устройства для перемещения в пространстве, а перемещение по поверхности в таких случаях не рассматривается. В тех случаях, когда подразумевается перемещение по поверхности за счет других движителей, тросовые движители выступают в качестве страхующих, а не основных движителей.

Исследуются тросовые роботы и в трудах А. В. Малолетова и Е. А. Марчука [7–10]; в них анализируются современные тросовые роботы,

в том числе созданные и исследуемые в Университете Иннополис, показаны проблемы и направления их решения при проектировании и эксплуатации тросовых роботов: учет нелинейности тросовых элементов, позиционные ошибки тросовых систем с избыточными связями, задачи их компенсации.

Тросовым роботам посвящены работы М. И. Ефимова и Е. С. Брискина [11–13], в которых описывается конструкция колесно-тросового робота, способного перемещаться по вертикальным поверхностям за счет прижима к поверхности и свободного вращения опорных колес при наматывании несущих тросов на тяговые барабаны, обеспечивающие подъем и перемещение по вертикальной плоскости. Также приводятся результаты натурных экспериментов на лабораторном макете, показывающие принципиальную возможность применения такого робота, границы применимости, проблемы, которые необходимо решать (например, преодоление незначительных препятствий); они успешно решаются в последующих работах).

В результате проведенного обзора и патентного поиска можно сделать вывод о значительных перспективах внедрения тросовых роботов в строительной отрасли при замене ручного или механизированного труда человека роботами при мониторинге, обследовании, обслуживании высотных зданий и сооружений, когда труд человека является опасным.

Наиболее рациональна разработка робота, удерживаемого тросами на вертикальной поверхности, а его прижатие к вертикальной поверхности должно регулироваться при помощи управления параметрами робота. При расчете таких параметров, как положение опор робота, центра тяжести или точки приложения силы натяжения троса, планируется обеспечить его надежное прижатие и, таким образом, осуществить перемещение робота по поверхности, в том числе с выполнением технологических операций, требующих устойчивое положение и точное позиционирование робота. При этом учитываются ориентация тросов, устанавливаемая углами, а также силы трения в опорах в качестве условия реализации надежного удержания робота на вертикальной поверхности. Однако надежное «прижатие» робота в широком диапазоне его положения на вертикальной поверхности, хоть и возможно рассчитать, но такие поверхности должны быть идеальными, что на практике, в условиях строительства, недос-

тижимо. В работе [8] рассчитаны силы для робота (рис. 1), удерживаемого двумя тросами и

имеющего четыре опоры, движущегося по ровной вертикальной поверхности.

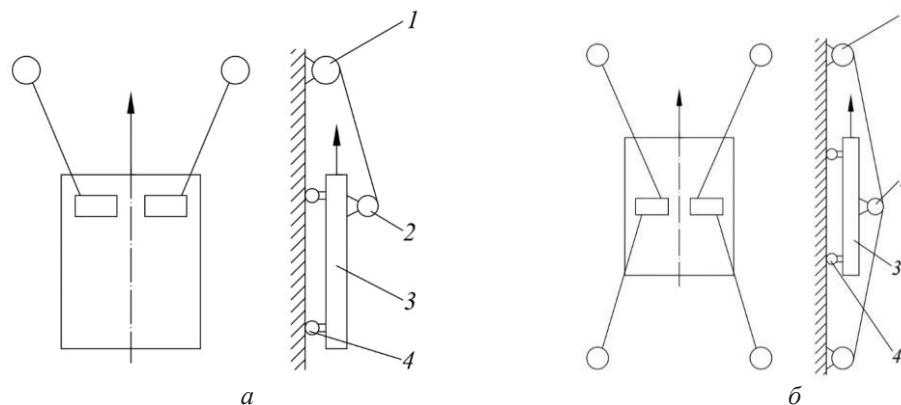


Рис. 1. Робот-прототип [13] (а) и предлагаемый вариант робота для мониторинга высотных зданий и сооружений (б): 1 – опорный барабан троса; 2 – тяговый барабан троса; 3 – корпус робота; 4 – пассивные опорные колеса

Предлагается вариант развития робота, показанного на рис. 1, а, в виде дополнения его тросов ветвями, идущими вниз (рис. 1, б), что позволяет осуществлять более надежный и управляемый прижим робота к поверхности; движение по вертикальным поверхностям с отрицательными углами наклона к нормали; движение по горизонтальным поверхностям, когда вектор силы тяжести пытается оторвать робот от опорной поверхности.

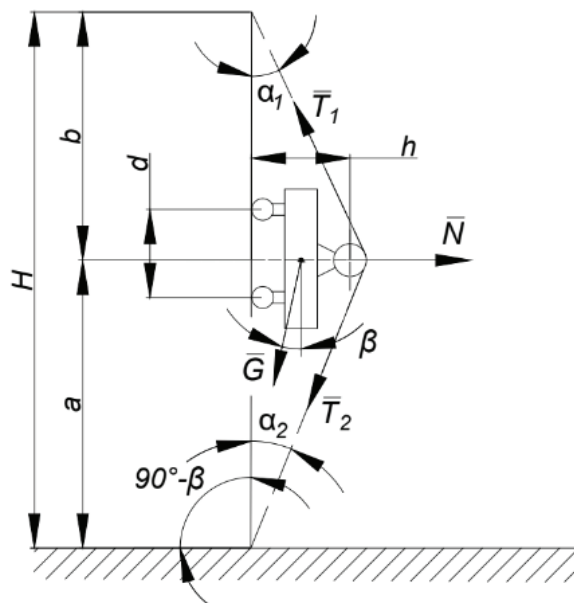


Рис. 2. Расчетная схема колесно-тросового робота на наклонной поверхности (при $\beta = 0$ на вертикальной поверхности)

Математическая модель предлагаемого робота в соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 2:

$$T_1 \sin \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2 - N + G \sin \beta = 0,$$

$$T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2 - G \cos \beta = 0.$$

Исходя из расчетной схемы (рис. 2), получаем кинематические соотношения для длин и углов наклона ветвей троса:

$$l_1 = \sqrt{h^2 + (H - a)^2}, \quad \alpha_1 = \arctg \frac{h}{H - a},$$

$$l_2 = \sqrt{h^2 + a^2}, \quad \alpha_2 = \arctg \frac{h}{a}.$$

Исходя из формулы для удлинения тросов, известной из общего курса сопротивления материалов, получаем выражения для определения удлинений тросов в каждой точке:

$$\Delta l_1 = \frac{T_1 l_1}{E_1 A_1},$$

$$\Delta l_2 = \frac{T_2 l_2}{E_2 A_2},$$

где E_i , A_i – соответственно модуль упругости и площадь сечения каждого из тросов.

Производя стандартные преобразования, получаем выражения для усилий в тросах:

$$T_1 = \frac{N - G \sin \beta + G \frac{h}{a} \cos \beta}{\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_1},$$

$$T_2 = \frac{N - G \sin \beta - G \frac{h}{H - a} \cos \beta}{\sin \alpha_2 + \cos \alpha_2 \operatorname{tg} \alpha_1}.$$

Для условного робота массой 100 кг, имеющего высоту оси барабана над опорной поверхностью $h = 0,8$ м, колесную базу опорной тележки $d = 0,5$ м, с одинаковыми тросами диа-

метром 6 мм, которые могут с запасом обеспечить перемещение такого робота, с параметрами $E_1 = E_2 = 1,6 \cdot 10^{11}$ Па; $A_1 = A_2 = 28,26 \cdot 10^{-6}$ м², получаем два вида графиков: для перемещения по вертикальной поверхности ($\beta = 0^\circ$) и для перемещения по поверхности с отрицательным наклоном ($\beta = -30^\circ$). Прижим к опорной поверхности полагается одинаковым для обоих случаев и равным $N = 100$ Н.

На рис. 3 приведен график суммарной длины тросов, который не зависит от угла наклона к горизонту, при этом видно, что на краях рабочего пространства суммарная длина меняется существенно, что говорит о том, что нижняя и верхняя ветви тросов изменяют длины по-разному, что приводит к невозможности использования одного барабана и для верхней,

и для нижней ветвей. При этом после 15 м от начала рабочего пространства и за 15 м до его конца изменения суммарной длины тросов незначительны по сравнению с удлинениями тросов от возникающих усилий. Такое же явление наблюдается и для робота-прототипа, но только на конце рабочего пространства, при приближении к верхней точке.

С этим явлением можно бороться либо применением разделенных барабанов, либо ограничением рабочего пространства робота, либо комбинированием движений – в нижней части рабочего пространства робот движется как робот-прототип, имея только одну верхнюю ветвь троса, с последующим подключением нижней ветви.



Рис. 3. Суммарная длина тросов при перемещении робота вдоль рабочего пространства

На рис. 4 показаны усилия натяжения тросов при перемещении робота вдоль рабочего пространства: на рис. 4, а – по вертикальной поверхности ($\beta = 0^\circ$); на рис. 4, б – по поверхности с отрицательным наклоном ($\beta = -30^\circ$),

при этом можно видеть, что при перемещении по вертикали максимально достижимая высота – 192 м; при отрицательном наклоне в 30° может быть достигнуто перемещение по усилиям в тросах 199 м.

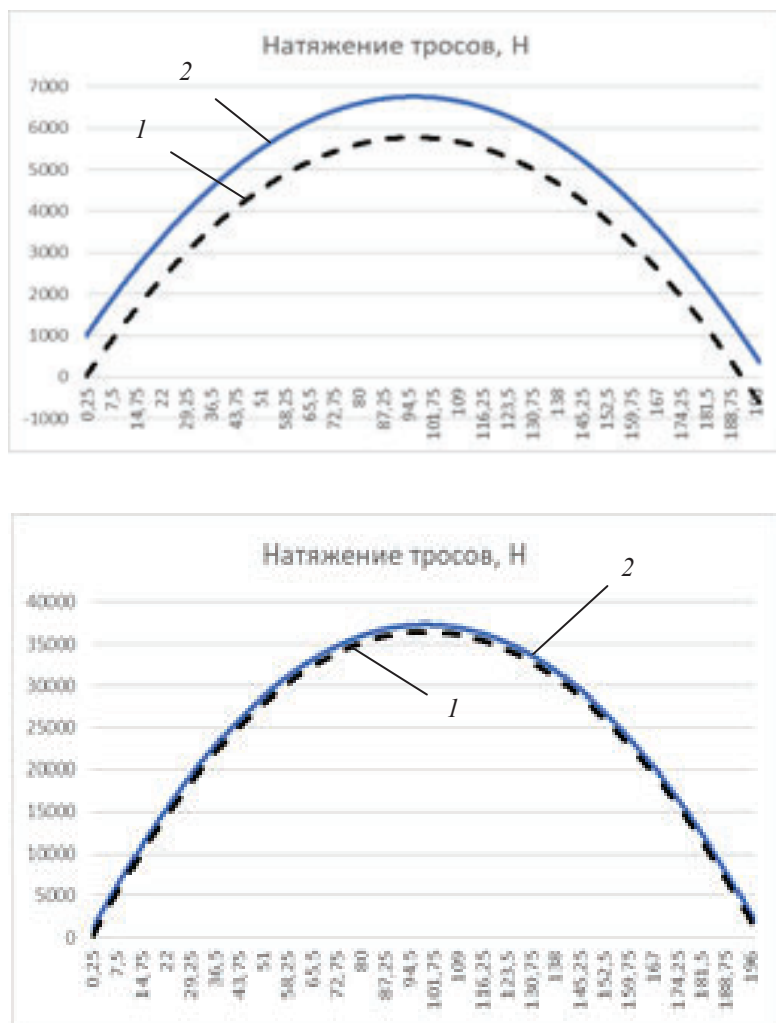


Рис. 4. Натяжения тросов при перемещении робота вдоль рабочего пространства:
 $\alpha - \beta = 0^\circ$; б – $\alpha - \beta = -30^\circ$: 1 – верхняя ветвь троса, 2 – нижняя ветвь троса

Также наблюдаются более высокие усилия натяжения тросов при отрицательном наклоне, так как составляющая силы тяжести оказывает большее влияние. При перемещении вдоль вертикали натяжения в верхней и нижней ветвях троса существенно различаются; при перемещении вдоль поверхности с отрицательным наклоном различия в натяжении тросов практически исчезают.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий [и др.]. – М. : Наука, 2001. – 369 с.
2. Быков, Н. В. Робот с магнитно-ленточным принципом вертикального перемещения / Н. В. Быков, Н. С. Власова, М. Ю. Губанов // Экстремальная робототехника : Труды Международной научно-технической конференции. – СПб. : Гангут, 2019. – С. 122–123.
3. Silva, M. A survey of technologies for climbing robots adhesion to surfaces / M. Silva, J. Machado, J. Tar // Proc. of the 6th IEEE Conference on Computational Cybernetics, November 27–29, 2008, Stara Lesna, Slovakia. – Pp. 127–132.
4. Qian, Sen & Zi. A Review on Cable-driven Parallel Robots / Qian, Sen & Zi, Bin & Shang, Wei-Wei & Xu, Qing-Song // Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018. 31. 66. 10.1186/s10033-018-0267-9.
5. Zoppi, M. Equilibrium analysis of multi-limbs walking and climbing robots / M. Zoppi, R. Molfino // Auton Robot, 2006, 21. – Pp. 199–210.
6. Zoppi, Matteo & Sgarbi, S & Molfino, Rezia & Bruzzone, Luca. Equilibrium analysis of quasi-static, multi-roped walking robots, 2020.
7. Пат. 2791827 C1 Российская Федерация, МПК E04G 21/02, E04B 1/35, E04B 1/16. Тросовая система с пассивным динамическим гасителем колебаний / А. В. Малолетов, Е. А. Марчук ; Университет Иннополис. – 2023.
8. Марчук, Е. А. О численном моделировании области рабочего пространства гибридного тросового робота / Е. А. Марчук // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 64–71.
9. Марчук, Е. А. Компенсация отклонений мобильной платформы параллельного тросового робота по силам натяжения тросов / Е. А. Марчук, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – № 2. – С. 113–123.

10. О выборе математических моделей висячих элементов при проектировании крупногабаритного параллельного тросового робота / Е. А. Марчук, Я. В. Калинин, М. А. Иванов, А. В. Малолетов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 56–62.

11. *Ефимов, М. И.* Об усилиях, действующих на тросовый робот, перемещающийся по ровной вертикальной поверхности / М. И. Ефимов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (263) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. –

(Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 31–37.

12. *Ефимов, М. И.* Экспериментальное исследование движения тросового робота по ровной вертикальной поверхности / М. И. Ефимов, П. С. Артемьев, Г. Ю. Прокудин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 28–33.

13. П. м. 201924 Российская Федерация, МПК E04G23/00. Тросовый робот вертикального перемещения / Е. С. Брискин, М. И. Ефимов, Н. Г. Шаронов ; ВолгГТУ. – 2021.