

М. С. Бабаев

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТРОСОВО-КОЛЕСНОГО РОБОТА
ПО НАКЛОННЫМ ПЛОСКИМ ПОВЕРХНОСТЯМ**

Волгоградский государственный технический университет

maxsin1525@mail.ru

В работе дается обзор основных механизмов и подходов, которые используют тросовые роботы, перемещающиеся по плоским вертикальным и наклонным поверхностям; описание применения тросово-колесных роботов с несколькими ветвями тросов для задач перемещения по таким поверхностям, получение закономерностей перемещения таких роботов.

Ключевые слова: тросовый робот, перемещение по плоским вертикальным и наклонным поверхностям.

M. S. Babaev

**REGULARITIES OF MOVEMENT OF A CABLE-WHEELED ROBOT
ON INCLINED FLAT SURFACES**

Volgograd State Technical University

The work provides an overview of the main mechanisms and approaches used by rope robots moving on flat vertical and inclined surfaces; describes the use of rope-wheeled robots with several branches of cables for tasks of moving on such surfaces, obtaining patterns of movement of such robots.

Keywords: rope robot, moving on flat vertical and inclined surfaces.

Введение

В статье [1] был приведен обзор способов перемещения роботов по вертикальным поверхностям. Цель работы – обосновать применение тросовых роботов по наклонным плоским поверхностям и для мониторинга, обследования и ремонта протяженных и высотных зданий и сооружений, что важно для применения в строительной отрасли.

Основные механизмы и подходы, которые используют роботы для преодоления препятствий на вертикальных и наклонных поверхностях благодаря своей конструкции и принципу работы:

- системы сцепления. Роботов оснащают специальными механизмами, которые обеспечивают надежное сцепление с поверхностями. Это могут быть когти [2] для перемещения по ковровым покрытиям; присоски, которые создают вакуум [3], или магниты [4], которые позволяют роботу удерживаться на металличе-

ских поверхностях. Некоторые модели используют специальные резиновые или текстильные покрытия, которые увеличивают трение. Роботы с гусеничным движением обеспечивают высокий уровень сцепления и могут преодолевать неровности и небольшие препятствия на плоских поверхностях [5];

- механизмы передвижения. Для перемещения роботов по плоским вертикальным и наклонным поверхностям часто используют тросы [6];

- адаптивные сенсоры. Оснащенные различными сенсорами, такими как камеры, ультразвуковые датчики и гироскопы, роботы могут обнаруживать препятствия и оценивать расстояние до них. Это позволяет им адаптировать свои движения и избегать столкновений [7];

- алгоритмы управления. Современные роботы используют сложные алгоритмы для управления движением. Эти алгоритмы позволяют им планировать маршрут, анализировать

окружающую среду и принимать решения в реальном времени, что особенно важно при преодолении препятствий [8–10].

Постановка задачи

В статье [11], опираясь на конструкцию из [12], описана математическая модель переме-

щения тросового робота по вертикальной поверхности.

В настоящей работе рассчитаны силы для робота, удерживаемого четырьмя тросами и имеющего четыре опоры, движущегося по ровной вертикальной поверхности.

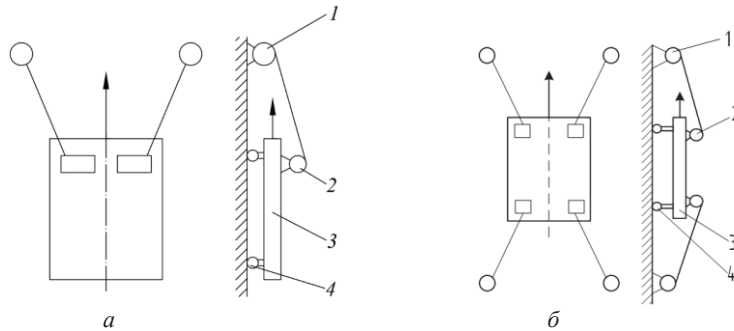


Рис. 1. Робот-прототип [6] (а) и предлагаемый вариант робота для мониторинга высотных зданий и сооружений (б):

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 наклонным поверхностям с отрицательными углами наклона к нормали, движению по горизонтальным поверхностям, когда вектор силы тяжести пытается оторвать робота от опорной поверхности.

Закономерности перемещения по плоским поверхностям

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

– уравнение равенства проекций всех сил на ось X нулю:

$$-T_1 \sin \alpha_1 - T_2 \sin \alpha_2 + N_1 + N_2 - G \sin \beta = 0; \quad (1)$$

– уравнение равенства проекций всех сил на ось Y нулю:

$$T_1 \cos \alpha_1 - T_2 \cos \alpha_2 - G \cos \beta = 0; \quad (2)$$

– уравнение равенства нулю моментов всех сил относительно ЦМ:

$$\begin{aligned} & -N_1 p_1 + N_2 p_2 + T_1 \left(\frac{d}{2} \cos \alpha_1 + h_2 - h_1 \right) - \\ & - T_2 \left(\frac{d}{2} \cos \alpha_2 + h_2 - h_1 \right) + \\ & + T_1 \left(\frac{d}{2} \sin \alpha_1 + l_1 \right) - T_2 \left(\frac{d}{2} \sin \alpha_2 + l_2 \right) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где d – диаметр барабана.

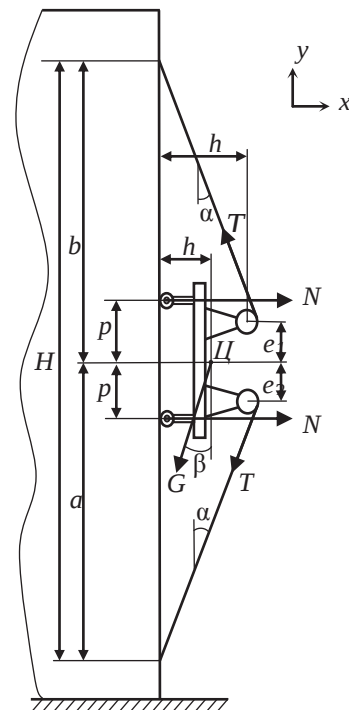


Рис. 2. Расчетная схема колесно-тросового робота на наклонной поверхности (при $\beta \neq 0$ на наклонной плоской поверхности, при $\beta = 0$ на вертикальной плоской поверхности):

ЦМ – центр масс робота, h_1 – расстояние от опорной поверхности до ЦМ, h_2 – расстояние от опорной поверхности до оси барабанов, e_1, e_2 – расстояния от осей барабанов 1, 2 до ЦМ соответственно, d – диаметр барабана, p_1, p_2 – расстояния от осей опор 1, 2 до ЦМ.

После приведения подобных членов получаем замкнутую систему из трех независимых уравнений плоской статики с четырьмя неизвестными N_1, N_2, T_1, T_2 :

$$\begin{cases} -T_1 \sin \alpha_1 - T_2 \sin \alpha_2 + N_1 + N_2 - G \sin \beta = 0 \\ T_1 \cos \alpha_1 - T_2 \cos \alpha_2 - G \cos \beta = 0, \\ -N_1 p_1 + N_2 p_2 + T_1 \left(\frac{d}{2} \cos \alpha_1 + h_2 - h_1 + \frac{d}{2} \sin \alpha_1 + l_1 \right) - \\ - T_2 \left(\frac{d}{2} \cos \alpha_2 + h_2 - h_1 + \frac{d}{2} \sin \alpha_2 + l_2 \right) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Из второго уравнения системы (4) выражаем T_1 :

$$T_1 = \frac{T_2 \cos \alpha_2 + G \cos \beta}{\cos \alpha_1} = 0. \quad (5)$$

Из первого уравнения системы (4) выражаем N_2 :

$$N_2 = G \sin \beta - N_1 + T_2 \sin \alpha_2 +$$

$$+ \frac{G \cos \beta + T_2 \cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} \sin \alpha_1. \quad (6)$$

Тогда из третьего уравнения системы (4) определяем T_2 как функцию N_1 :

$$\begin{aligned} & -N_1 p_1 + G \cdot p_2 \sin \beta - N_1 p_2 + T_2 p_2 \sin \alpha_2 + \frac{G \cos \beta + T_2 \cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} p_2 \sin \alpha_1 + \\ & + \frac{G \cos \beta + T_2 \cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} \left(\frac{d}{2} \cos \alpha_1 + h_2 - h_1 + \frac{d}{2} \sin \alpha_1 + l_1 \right) = \\ & = T_2 \left(\frac{d}{2} \cos \alpha_2 + h_2 - h_1 + \frac{d}{2} \sin \alpha_2 + l_2 \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Преобразуя, получаем:

$$\begin{aligned} & -N_1 p_1 + G \cdot p_2 \sin \beta - N_1 p_2 + G \cos \beta p_2 \operatorname{tg} \alpha_1 + G \frac{\cos \beta}{\cos \alpha_1} \left(\frac{d}{2} (\cos \alpha_1 + \sin \alpha_1) + l_1 + h_2 - h_1 \right) = \\ & = T_2 \left(\frac{d}{2} (\cos \alpha_2 + \sin \alpha_2) + l_2 + h_2 - h_1 \right) - T_2 \frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} \left(\frac{d}{2} (\cos \alpha_1 + \sin \alpha_1) + l_1 + h_2 - h_1 \right) - \\ & - T_2 p_2 \sin \alpha_2 - T_2 p_2 \cos \alpha_2 \operatorname{tg} \alpha_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Отсюда выражаем T_2 как функцию N_1 , угла β , углов α_1 и α_2 :

$$T_2 = \frac{-N_1 A + G[B + C]}{D - E - F}, \quad (9)$$

где $A = (p_1 + p_2)$, $B = p_2 (\sin \beta + \cos \beta \operatorname{tg} \alpha_1)$;

$$C = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha_1} \left(\frac{d}{2} (\cos \alpha_1 + \sin \alpha_1) + l_1 + h_2 - h_1 \right);$$

$$D = \frac{d}{2} (\cos \alpha_2 + \sin \alpha_2) + l_2 + h_2 - h_1;$$

$$E = \frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} \left(\frac{d}{2} (\cos \alpha_1 + \sin \alpha_1) + l_1 + h_2 - h_1 \right).$$

Через известную функцию T_2 выражаем из (5) и (6) $T_1(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$ и $N_2(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$ соответственно.

Строим графики функций $T_1(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, $T_2(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, $N_2(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$. В данном исследовании определяем функции $T_1(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, $T_2(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, $N_2(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$ как функции

одного аргумента — N_1 , задаваясь остальными переменными: α_1 , α_2 , β как константами конкретного расчета. При этом α_1 , α_2 вычисляются по простым геометрическим формулам:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{(h_2 + d/2)}{H - a},$$

$$\alpha_2 = \arctg \frac{(h_2 + d/2)}{a}.$$

Обсуждение результатов

Для условного робота весом $G = 500$ Н с конструктивными параметрами: $h_1 = 0,5$ м, $h_2 = 0,9$ м, $e_1 = 0,5$ м, $e_2 = 0,5$ м, $d = 0,2$ м, $p_1 = 0,7$ м, $p_2 = 0,7$ м, для высоты размещения опор тросового робота на здании $H = 180$ м, получаем результаты, приведенные на рис. 3–5, на которых указаны характерные 9 из 126 графиков, построенных для комбинации дискретных наборов $\beta = 0^\circ, 30^\circ, -30^\circ, -45^\circ, -60^\circ, -90^\circ$, $a = 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 155, 160, 165, 170$.

Из анализа представленных графиков можно сделать вывод о линейном росте N_2 , T_1 , T_2 при росте N_1 независимо от геометрических условий применений робота. При этом наблюдается рост значения реакций T_1 , T_2 при росте a до середины расстояния H , потом наблюдается симметричный спад при уменьшении a .

Существуют области отрицательных значений T_2 (реакции троса в нисходящей ветви) при малых значениях N_1 , в таком случае может быть применен робот только с восходящими ветвями, это особенно заметно при нулевых и положительных углах наклона опорной поверхности.

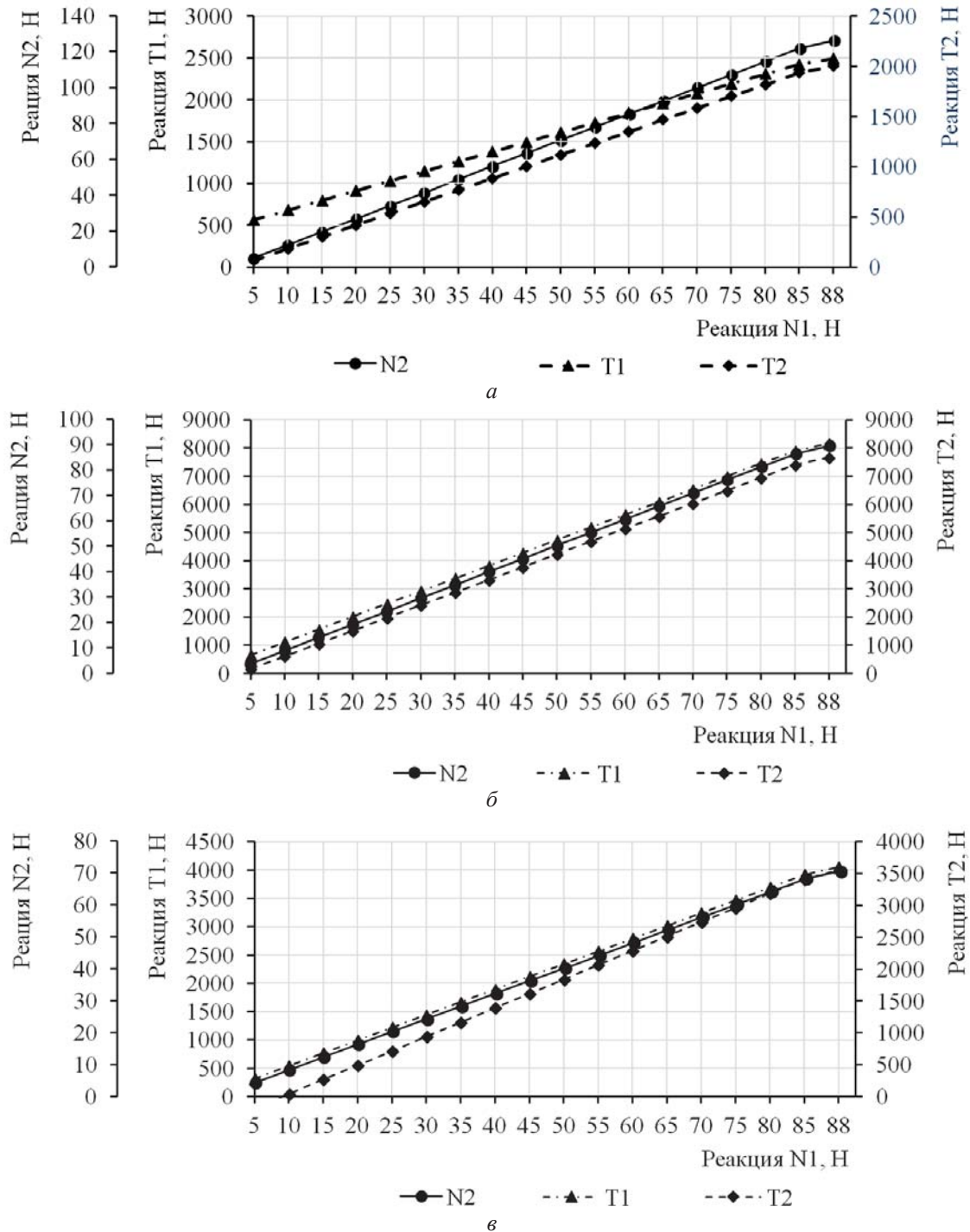


Рис. 3. Графики функций $T_1(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, $T_2(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, $N_2(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, построенные для комбинации дискретных наборов:
 a – реакции при $\beta = 0^\circ$, $a = 10$ м; $б$ – реакции при $\beta = 0^\circ$, $a = 80$ м; $в$ – реакции при $\beta = 0^\circ$, $a = 150$ м

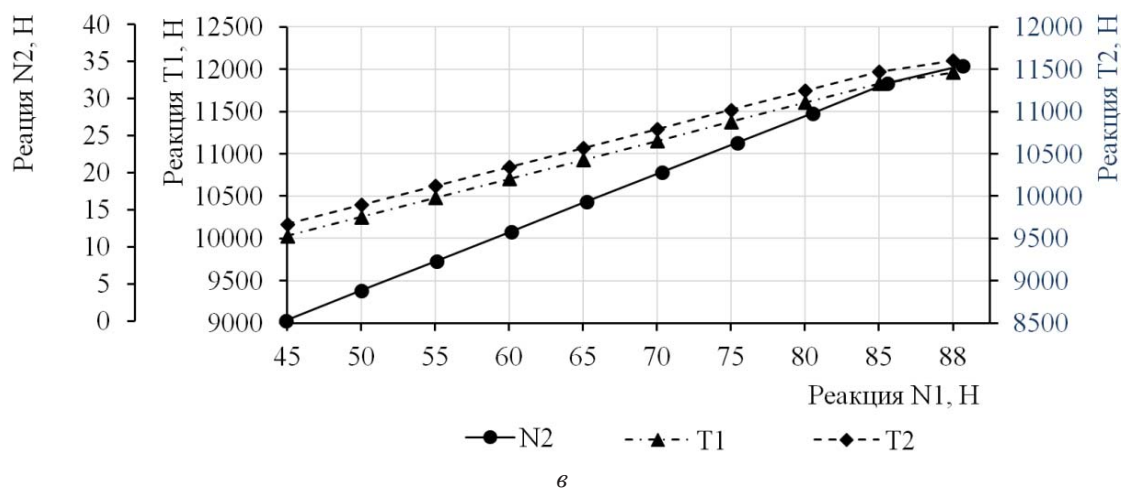
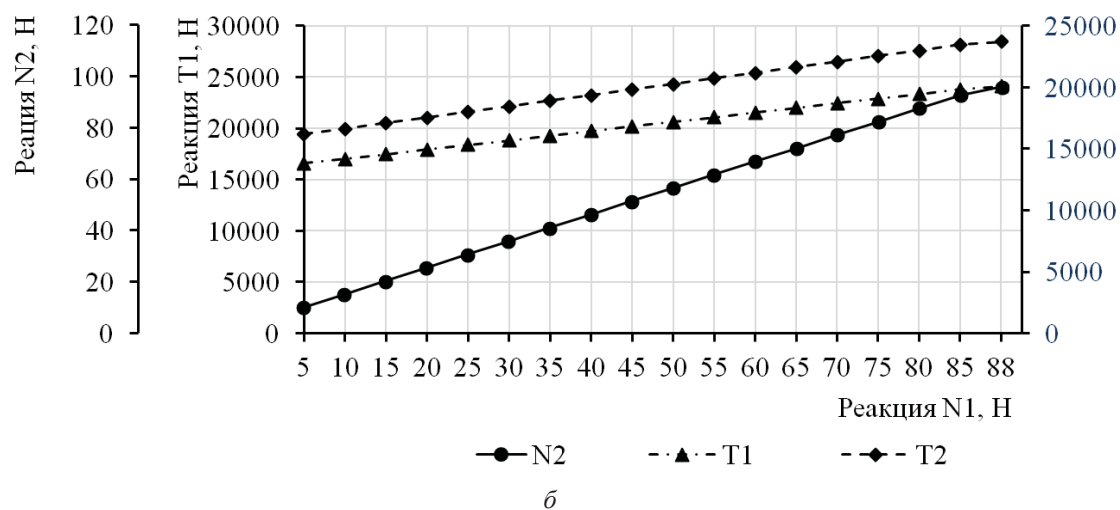
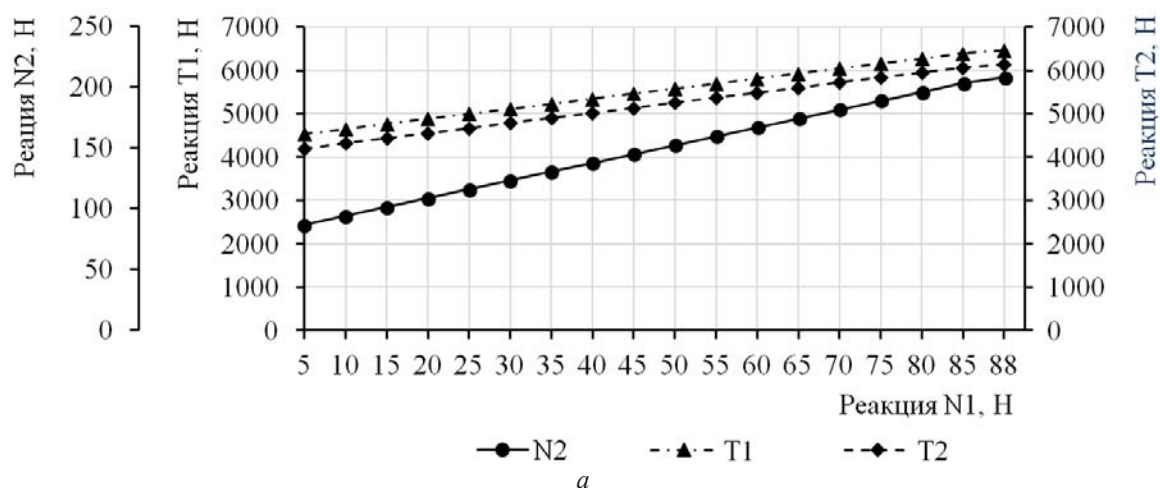


Рис. 4. Графики функций $T_1(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, $T_2(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, $N_2(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, построенные для комбинации дискретных наборов:
 а – реакции при $\beta = -45^\circ$, $a = 10$ м; б – реакции при $\beta = -45^\circ$, $a = 80$ м; в – реакции при $\beta = -45^\circ$, $a = 150$ м

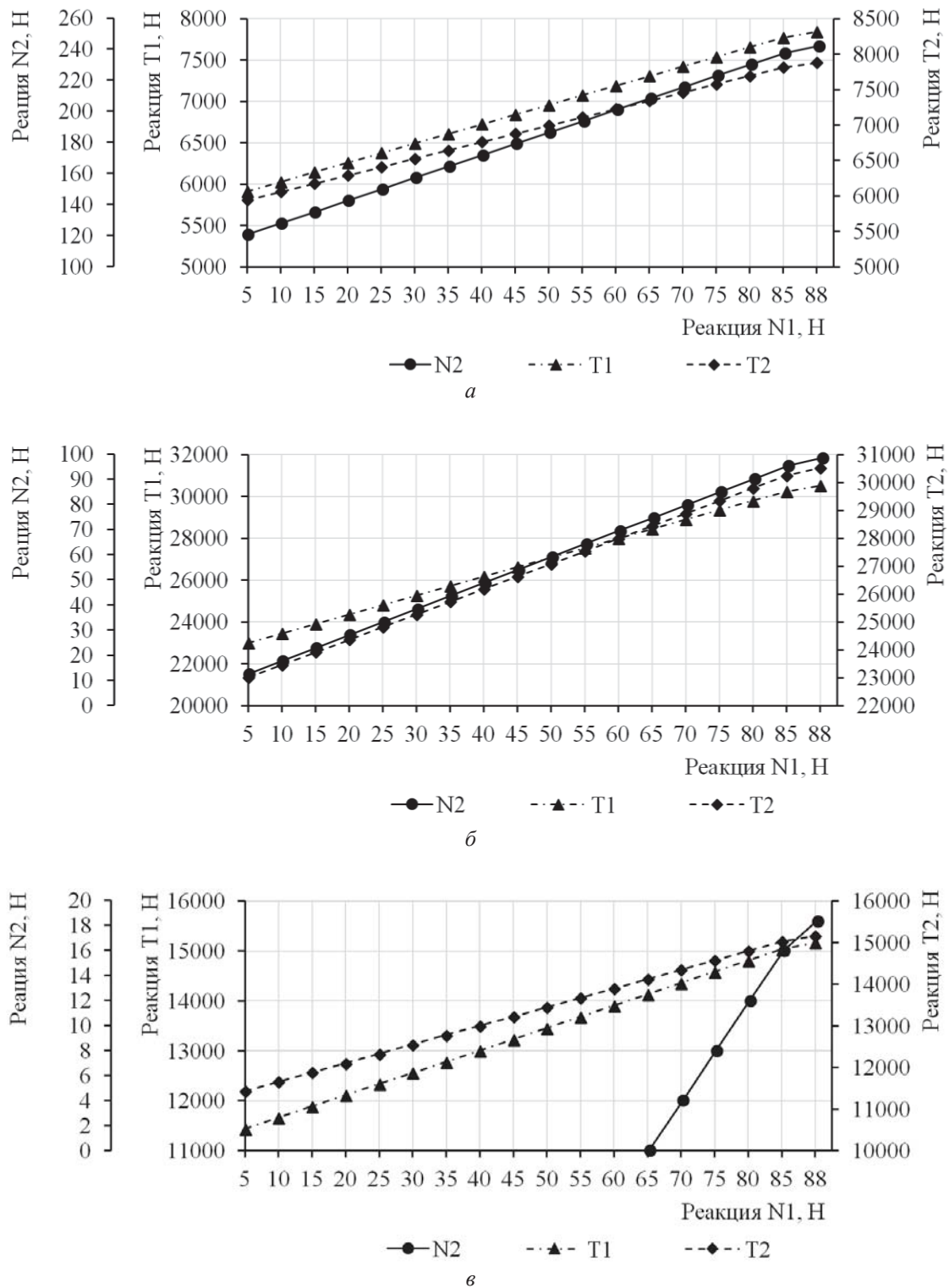


Рис. 5. Графики функций $T_1(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, $T_2(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, $N_2(N_1, \alpha_1, \alpha_2, \beta)$, построенные для комбинации дискретных наборов:
 а – реакции при $\beta = -90^\circ$, $a = 10$ м; б – реакции при $\beta = -90^\circ$, $a = 80$ м; в – реакции при $\beta = -90^\circ$, $a = 150$ м

Также наблюдаются более высокие усилия натяжения тросов при отрицательном наклоне, так как составляющая силы тяжести оказывает большее влияние, пытаясь оторвать робота от

опорной поверхности. При перемещении вдоль вертикали и по наклонной поверхности с положительным углом наклона натяжение в верхней и нижней ветвях троса существенно различа-

ется, при перемещении вдоль поверхности с отрицательными углами наклона различия в натяжении тросов практически исчезают.

Заключение

За счет подбора рациональной конструкции работа и управления опорной реакцией N_1 (или N_2) возможно обеспечивать перераспределение реакций в тросах и таким образом управлять ими целенаправленно, например, для выравнивания усилий, минимизации суммарного усилия либо суммы квадратов усилий, что одно-значно влияет на энергетику приводных двигателей барабанов, на которые наматываются тросы. Отсюда, например, может быть поставлена оптимизационная задача, сходная по типу [13], которая в таком случае может быть решена прямыми переборными методами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабаев, М. С. Робот для мониторинга высотных зданий и сооружений / М. С. Бабаев, Е. С. Брискин, Я. В. Калинин // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике : сб. тез. докладов в 4 томах. Т. 1. Общая и прикладная механика. Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года. – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. – С. 473–475.
2. Фокин, А. Робоящерица научилась эффективно ползать по стене [Электронный ресурс] / А. Фокин. – Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2021/04/06/climbing-robot-lizards>, свободный (дата обращения: 10.12.2024 г.).
3. Агеев, А. Новый робот-скалолаз может удержаться на любой поверхности [Электронный ресурс] / А. Агеев. – Режим доступа: <https://www.techcult.ru/robots/7813-robot-skalolaz-mozhet-uderzhatsya-na-lyuboj-poverhnosti>, свободный (дата обращения: 10.12.2024 г.).
4. Фокин, А. Робот с магнитами в ногах прошелся по стене и залез на потолок [Электронный ресурс] / А. Фокин. – Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2023/07/28/magnecko> (дата обращения: 10.12.2024 г.).
5. Webster, A. GE uses climbing robots to inspect wind turbine blades [Электронный ресурс] / A. Webster. – Режим доступа: <https://www.theverge.com/2012/6/13/3083141/ge-wind-turbine-robot> (дата обращения: 10.12.2024 г.).
6. П.м. 202828 Российская Федерация, МПК E04G 23/00, A47L 1/02, E04G 3/30. Тросовый робот вертикального перемещения / Е. С. Брискин, М. И. Ефимов, Н. Г. Шаронов ; ВолГГТУ. – 2021.
7. Тырса, В. В. Навигация мобильных роботов с использованием оптических сканирующих систем / В. В. Тырса // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – № 2. – С. 16–21.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660280 Российская Федерация. Навигационная система мобильных роботов "Навирос" / М. В. Суворов, А. Ю. Любимов, А. В. Белоус ; ООО "НАВИРОС". – 2024.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619756 Российская Федерация. Программа для управления гусеничным роботом с локализацией без столкновения с препятствиями / Д. А. Пономарев, А. В. Девяткин, Т. О. Кузьмина ; ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018.
10. Марчук, Е. А. О численном моделировании области рабочего пространства гибридного тросового робота / Е. А. Марчук // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 64–71.
11. Бабаев, М. С. Тросовый робот для мониторинга и обслуживания высотных зданий и сооружений / М. С. Бабаев, Я. В. Калинин // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 9 (280) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 6–11.
12. П.м. 201924 Российская Федерация, МПК E04G 23/00. Тросовый робот вертикального перемещения / Е. С. Брискин, М. И. Ефимов, Н. Г. Шаронов ; ВолГГТУ. – 2021.
13. Брискин, Е. С. Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин // Известия РАН: Теория и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 170–176.