

УДК 004.896+007.3+007.52+51-74+517.97+62-52+681.5
DOI 10.35211/1990-5297-2023-9-280-33-40

А. В. Леонард

**ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНОГО РОБОТА
С ОБХОДОМ СТАЦИОНАРНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ
НА ОСНОВЕ ПОДХОДА VC/APF+BC_τ¹**

Волгоградский государственный технический университет

Alex-Leonard@yandex.ru

Рассматриваются свойства оптимального планирования движения наземного робота с обходом статического препятствия при заданных краевых условиях (координатах, скоростях) и времени движения (BC_τ¹). Планирование движения реализуется на основе подхода VC/APF+BC_τ¹ – совместного применения вариационного исчисления (VC) и искусственного потенциального отталкивающего поля (APF).

Ключевые слова: мобильный робот, планирование движения, вариационное исчисление, метод потенциальных полей, оптимальное управление.

© Леонард А. В., 2023.

A. V. Leonard

FEATURES OF MOTION PLANNING OF A GROUND ROBOT WITH BYPASSING A STATIONARY OBSTACLE BASED ON THE VC/APF+BC_τ¹ APPROACH

Volgograd State Technical University

The article considers the properties of optimal motion planning for a ground robot with a bypass of a static obstacle for given boundary conditions (coordinates, velocities) and motion time (BC_τ¹). Motion planning is implemented on the basis of the VC/APF+BC_τ¹ approach – the joint application of the calculus of variations (VC) and the artificial potential field (APF).

Keywords: mobile robot, motion planning, calculus of variations, potential field method, optimal control

Введение

Предложенный в работах [1–3] подход VC/APF+BC_τ¹ основывается на решении вариационной задачи с граничными условиями по обходу наземным роботом на плоском основании статичного препятствия за отведенное оперативное время, без сил сопротивления. При этом перемещение робота разделяется на три режима: 1 – глобальное планирование движе-

ния (сенсоры робота не фиксируют препятствие); 2 – локальное планирование движения (сенсоры обнаруживают препятствие); 3 – глобальное планирование движения (робот преодолел препятствие). Законы движения для первого и третьего режимов определяются аналитически с помощью вариационного исчисления, исходя из интегрального критерия вида (с соответствующими краевыми условиями):

$$I = \int_0^{\tau(\tau_2)} \Phi(t, x, y, \dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}) dt, \quad \Phi = \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{m\dot{y}^2}{2} + \frac{k_a\ddot{x}^2}{2} + \frac{k_a\ddot{y}^2}{2}, \quad (1)$$

где m – масса робота; x, y – координаты центра масс робота; k_a – размерный коэффициент пропорциональности; $\tau(\tau_2)$ – заданное (оставшееся) время перемещения робота. Законы

движения для второго режима (обхода препятствия) определяются в дифференциальной форме, исходя из критерия, в который входит функция поля [4, 5] (отталкивающего робота от препятствия в форме окружности радиуса R_1):

$$I = \int_0^{\tau_1} \Phi(t, x, y, \dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}) dt, \quad \Phi = \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{m\dot{y}^2}{2} - \begin{cases} \frac{c}{2} \left[(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 - 2r_0 \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + r_0^2} \right], & r \leq r_0 \\ 0, & r > r_0 \end{cases}, \quad (2)$$

где x_1, y_1 – координаты центра препятствия в виде окружности; r_0 – радиус окружности, определяющий размер внешней границы поля; c – параметр поля (жесткость условной пружины). Значение параметра c определяется из закона сохранения энергии с учетом сохранения момента импульса относительно центра поля (при остановке центра масс робота на внутренней границе поля):

$$\frac{mV_{\parallel}^2|_{r=r_0}}{2} + \frac{mV_{\perp}^2|_{r=r_0}}{2} = \frac{mV_{\perp}^2|_{r=r_0}}{2} \frac{r_0^2}{r_{\min}^2} + \frac{c}{2} (r_{\min} - r_0)^2, \quad (3)$$

где $V_{\parallel}|_{r=r_0}$ – компонент вектора скорости центра масс робота, направленный к центру препятствия в момент его входа в поле отталкива-

ния; $V_{\perp}|_{r=r_0}$ – компонент вектора скорости центра масс робота, направленный перпендикулярно к линии, соединяющей центр масс робота и центр препятствия, в момент его входа в отталкивающее поле; $r_{\min}$ – минимально допустимое расстояние между центром масс робота и центром препятствия в поле (размер внутренней границы поля): $r_{\min} \geq R + R_1$.

1. Влияние вектора скорости робота на обход препятствия

При определенных режимах движения оказывается, что аналитически синтезированная траектория движения робота (R) пересекает зону радиуса $r_{\min}$ (внутреннюю границу поля),

а линия вектора скорости центра масс робота на входе в поле (r_0) проходит вне зоны $r_{\min}$ (не пересекая ее). В этом случае значение жесткости (c) условной пружины приобретает отрицательные значения, что приводит к сближе-

нию робота с препятствием (рис. 1) и к увеличению времени нахождения робота в поле. Как следствие, возрастает вероятность неопадания робота в финальную точку за отведенное оперативное время (τ).

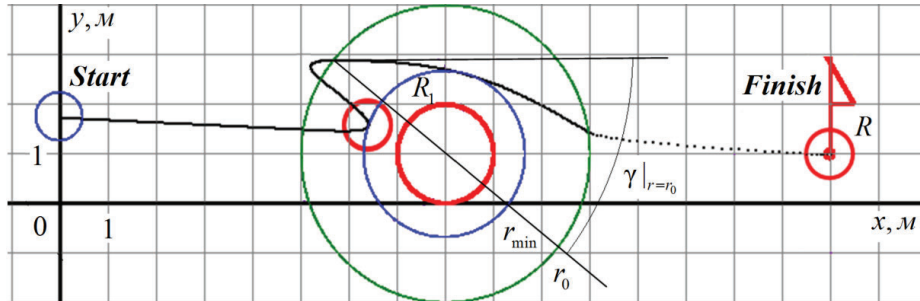


Рис. 1. Влияние вектора скорости (на входе в поле) на обход препятствия

Условие, при котором значение жесткости условной пружины приобретает отрицательное значение, может быть получено из формулы (3):

$$\sin^2 \gamma|_{r=r_0} > \frac{r_{\min}^2}{r_0^2}, \quad (4)$$

где $\gamma|_{r=r_0}$ – угол между вектором скорости робота на входе в поле и линией, проходящей через точку входа робота в поле и центр препятствия в форме окружности R_1 . Для того чтобы значения жесткости условной пружины (пара-

метра поля c) были неотрицательными, алгоритм навигации робота должен отслеживать выполнение условия

$$\sin^2 \gamma|_{r=r_0} \leq \frac{r_{\min}^2}{r_0^2} \quad (5)$$

Если условие (5) выполняется, то расчет параметра поля ведется по формуле (21) [1]. В противоположном случае необходимо назначение параметра поля, например равным нулю (рис. 2) или равным значению параметра поля при предыдущем входе в поле (рис. 3).

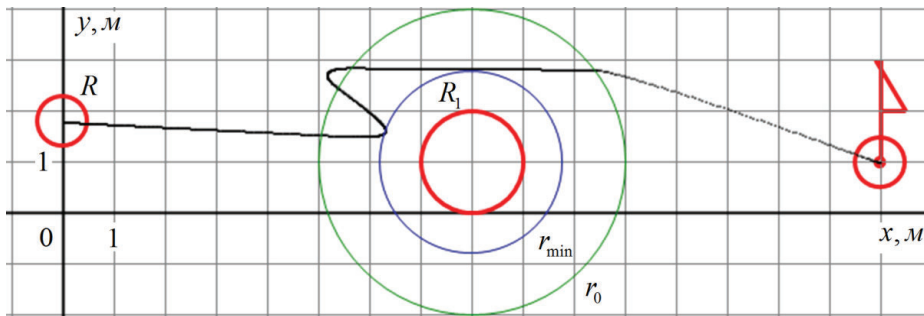


Рис. 2. Обход препятствия при нулевом значении параметра поля:

$$V_{\text{aver}} = 1,6 \text{ м/с}; V_{\text{max}} = 7,61 \text{ м/с}; a_{\text{max}} = 26,78 \text{ м/с}^2; N_{\text{max}} = 76,67 \text{ Вт}$$

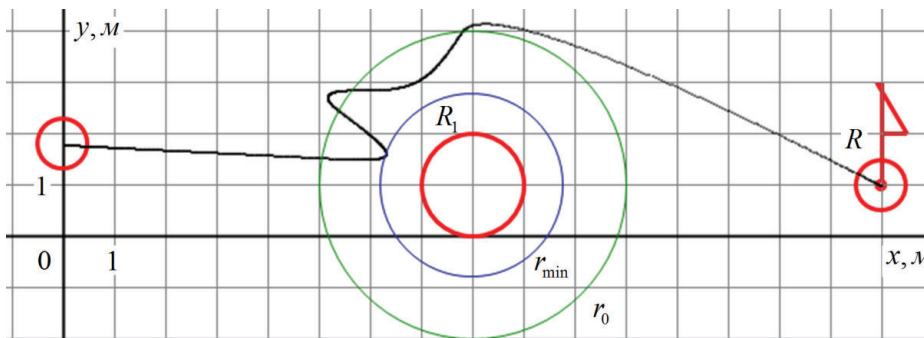


Рис. 3. Обход препятствия с ненулевым значением параметра поля:

$$V_{\text{aver}} = 1,6 \text{ м/с}; V_{\text{max}} = 5,96 \text{ м/с}; a_{\text{max}} = 12,13 \text{ м/с}^2; N_{\text{max}} = 27,17 \text{ Вт}$$

На рис. 2 и 3: V_{aver} , V_{max} – средняя и максимальная скорость робота; a_{max} – максимальное ускорение; N_{max} – максимальная потребляемая мощность.

Однако в представленном на рис. 2 случае (в сравнении с режимом движения, рис. 3) равенство нулю параметра поля приводит к кратному увеличению максимального ускорения, потребляемой силы и мощности привода. Чем дальше робот движется в поле (без «стремления» к цели), тем меньше остается времени для попадания робота в финальную точку – и тем больше максимальное ускорение у робота по выходу из поля.

2. Влияние размеров поля на обход препятствия

Для оценки влияния размеров поля на характеристики режимов обхода статического препятствия были проведены две серии численных экспериментов. Стартовое и финальное положение центра масс робота, размер робота, препятствия, внутренние границы поля, абсцисса

центра препятствия, масса робота (1 кг), коэффициент k_a (1 кг·с²), время движения (10 с), временной шаг (10 мс) фиксировались (рис. 4). Для двух значений расстояния r (0,8; 0,1) между прямой (проходящей через начальное и конечное положение центра масс робота) и центром препятствия варьировался размер поля $d = r_0 - r_{min}$; $r_{min} = \text{const}$. Скорости центра масс робота в начальной и конечной точках задавались равными нулю.

При уменьшении размера поля, для режимов движения, когда $r = 0,1$ м, наблюдается рост числа касаний центром масс робота внутренней границы поля (r_{min}) (рис. 5). С ростом размера поля (около значений 2 и 4 м), при $r = 0,1$ м, наблюдается экспоненциальный рост максимальной скорости центра масс робота (рис. 6). Аналогичным образом изменяются зависимости максимального ускорения центра масс робота и максимальной потребляемой мощности (рис. 7, 8).

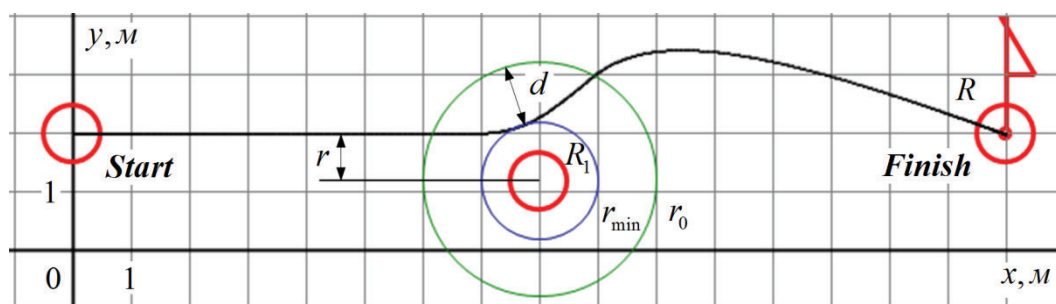


Рис. 4. Схема обхода препятствия при варьировании r_0 для двух значений r

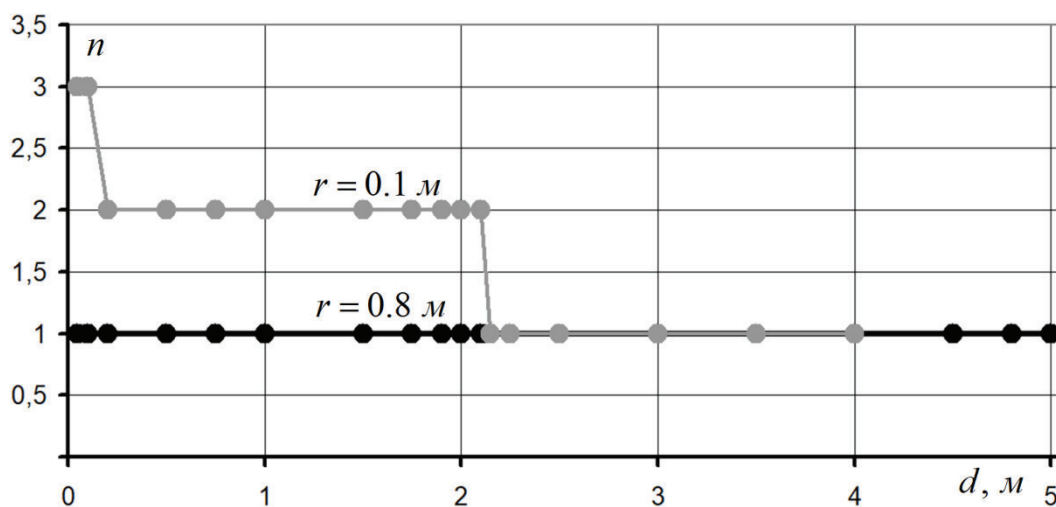


Рис. 5. Зависимость количества входов робота в поле от размера поля

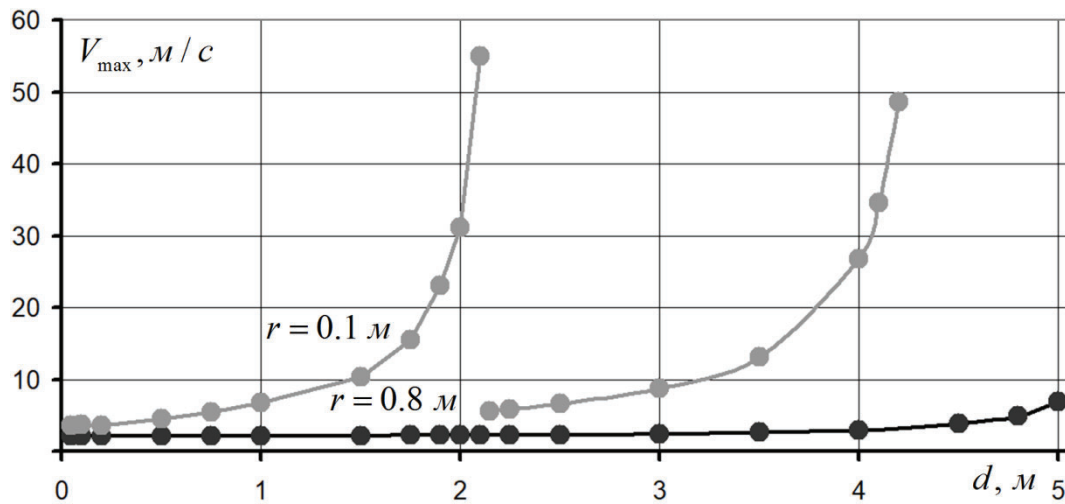


Рис. 6. Зависимость максимальной скорости робота от размера поля

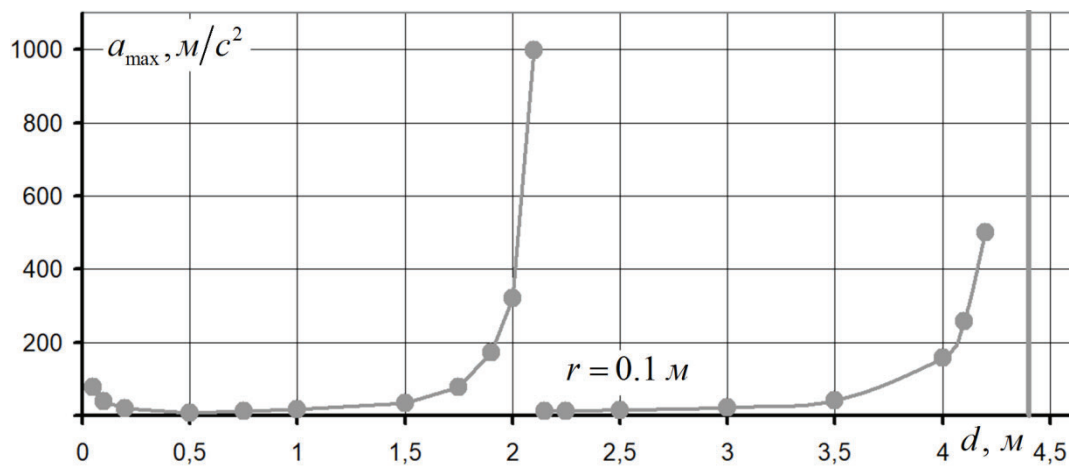


Рис. 7. Зависимость максимального ускорения от размера поля: $r = 0,1$ м

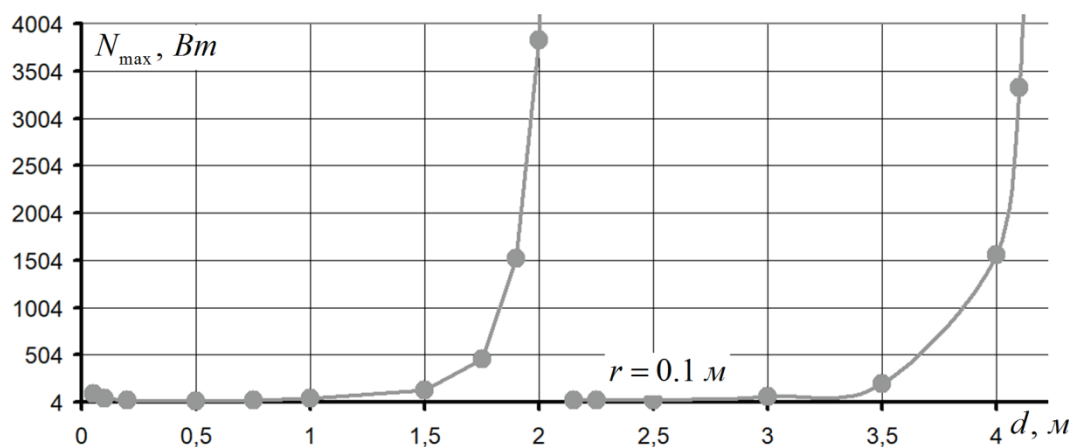


Рис. 8. Зависимость максимальной мощности от размера поля: $r = 0,1$ м

Для режимов движения $r = 0,8$ м характерно экспоненциальное изменение максимального

ускорения и максимальной мощности, при $d < 0,5$ м и $d > 4$ м (рис. 9, 10).

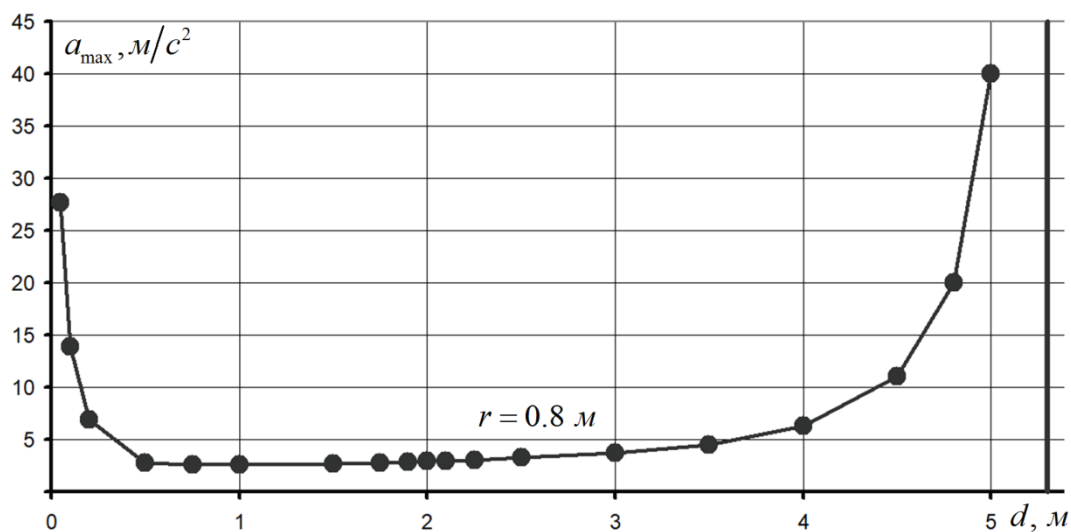


Рис. 9. Зависимость максимального ускорения от размера поля:
 $r=0,8\text{ м}$

При малом размере поля ($d < 0,5\text{ м}$) рост максимального ускорения и максимальной мощности обусловлен торможением робота с полной остановкой на внутренней границе поля. При значительном размере поля ($d > 4\text{ м}$)

большую часть времени (из отведенного) робот движется внутри поля, что с ростом размера поля вызывает рост максимального ускорения центра масс робота и максимальной мощности по выходу робота из поля.

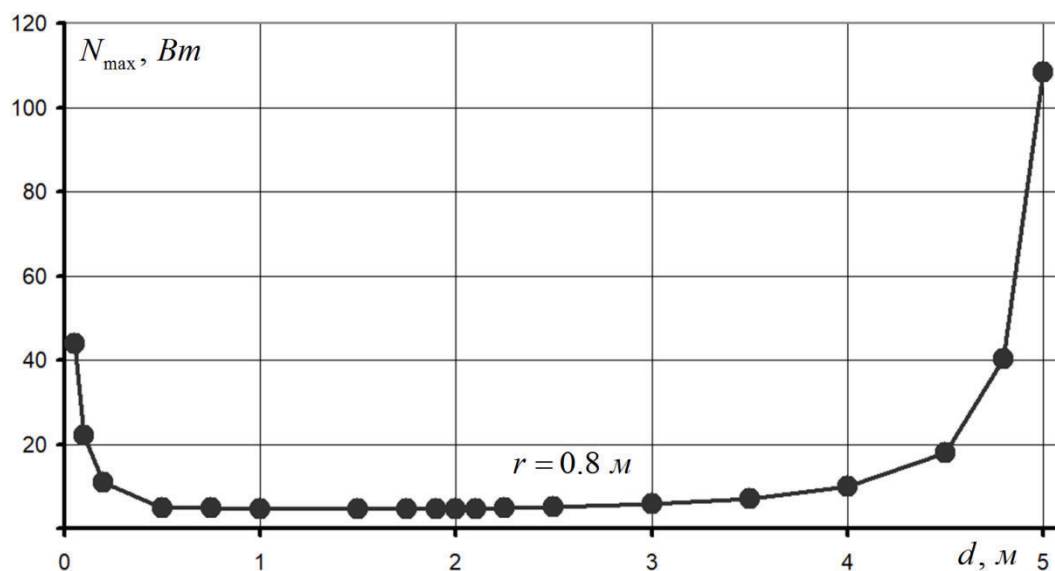


Рис. 10. Зависимость максимальной мощности от размера поля:
 $r=0,8\text{ м}$

Анализ численных экспериментов показывает, что время, затрачиваемое процессором на

выполнение алгоритма по обходу препятствия, уменьшается с ростом размера поля (рис. 11, 12).

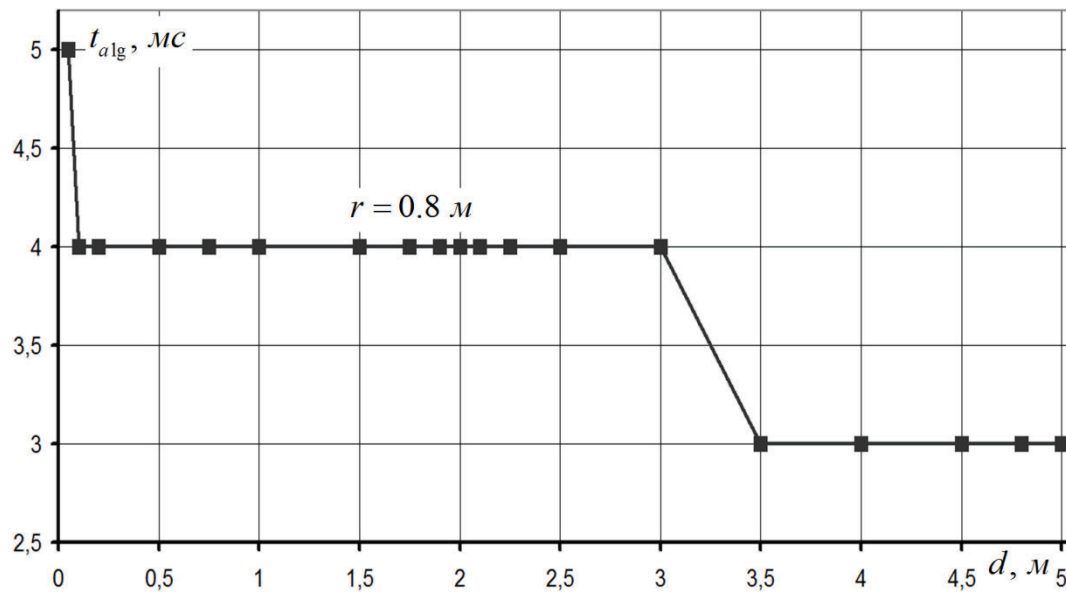


Рис. 11. Зависимость времени выполнения процессором алгоритма обхода препятствия от размера поля:
 $r = 0,8 м$

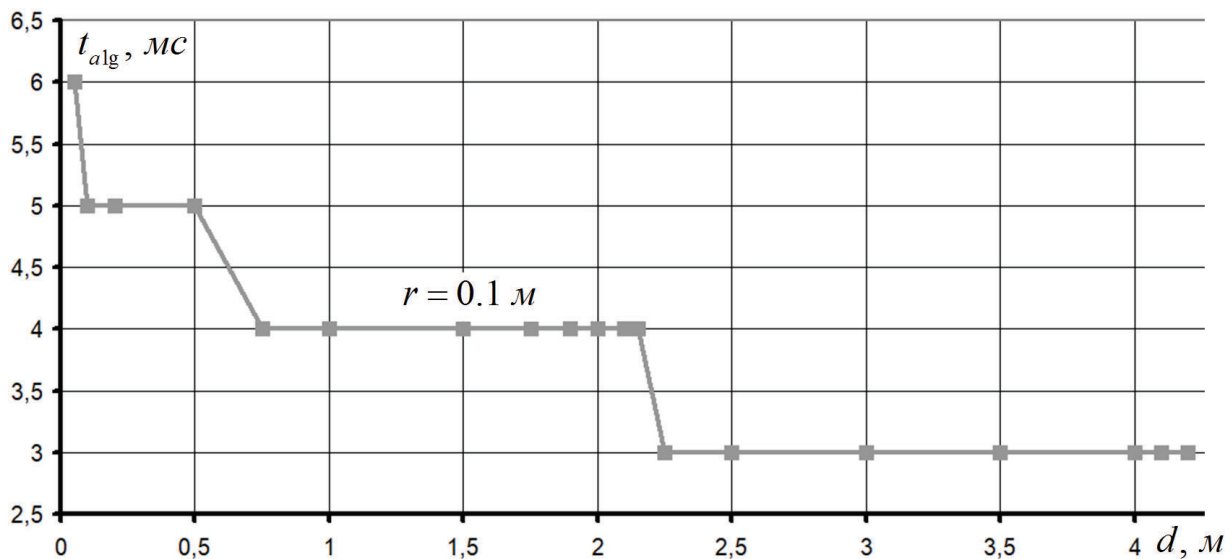


Рис. 12. Зависимость времени выполнения процессором алгоритма обхода препятствия от размера поля:
 $r = 0,1 м$

Заключение

Полученное неравенство (4) определяет условие возникновения эффекта притяжения робота к препятствию. Из анализа графиков (рис. 6–10) следует, что размер поля существенным образом влияет на физическую реализуемость обхода статичного препятствия. Для реализации обхода препятствия за отведенное оперативное время при заданных краевых условиях (координатах, скоростях центра масс робота), исходя из задаваемых физических ограничений на ускорения робота и мощность привода, необ-

ходимо осуществлять подбор размера поля. Автоматический подбор размера поля (внешней границы поля) может быть реализован на основе решения соответствующей оптимизационной задачи с учетом дальности действия сенсора (2D-LIDAR) [6]. Максимальное время, затрачиваемое процессором на выполнение алгоритма по планированию обхода статичного препятствия, не превосходит 7 мс, что является приемлемым показателем для использования алгоритма в реальных системах управления мобильными роботами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_{\tau}^I$). Ч. I. Теория // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 34–42.
2. Леонард, А. В. Планирование движения наземного робота с обходом стационарного препятствия при заданных: начальных и конечных координатах, скоростях и оперативном времени ($VC/APF+BC_{\tau}^I$). Ч. II. Результаты / А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (268) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 42–48.
3. Планирование движения наземного робота с учетом его 2D-пространственной ориентации и обходом одного статичного препятствия / А. М. Кошман, А. С. Быков, А. В. Леонард, В. А. Шурыгин // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 51–57.
4. Филимонов, А. Б. Вопросы управления движением мобильных роботов методом потенциального наведения / А. Б. Филимонов, Н. Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – № 11. – С. 677–685.
5. Chunxi Cheng. Path planning and obstacle avoidance for AUV: A review / Chunxi Cheng, Qixin Sha, Bo He, Guangliang Li // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 235. Article 109355.
6. Быков, А. С. Разработка и совместное моделирование алгоритмов обработки данных о среде, полученных 2D-LIDAR / А. С. Быков, А. М. Кошман, А. В. Леонард // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 (275) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»). – С. 29–33.