

Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание
МОО "Стратегия объединения"
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:

//Машины и установки: проектирование,
разработка и эксплуатация.

Электрон. журн. 2025. № 3. С. 21 – 32

DOI:

Представлена в редакцию: 25.09.2025

Принята к публикации: 01.10.2025

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 629.331

Алгоритм системы управления автоматическим движением колесной машины по заданной траектории

Бякова А.А., *
Бяков К.Е.,
Комиссаров А. И.

* bratchina@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)

Работа посвящена совершенствованию алгоритма системы управления автоматическим движением колесной машины по заданной траектории. В качестве объекта исследования выступает двухосный автомобиль с системой управления автоматическим движением по заданной траектории. Целью работы является повышение точности автоматического движения колесной машины по заданной траектории путем совершенствования рационального алгоритма управления.

В результате исследования проведена оценка эффективности алгоритма управления, обеспечивающего движение колесной машины по заданной траектории.

Ключевые слова: автоматическое движение, алгоритм управления, криволинейная траектория, pure pursuit, датчики, целевая точка.

Введение

В настоящее время активно развиваются системы, предназначенные для автоматизации управления транспортными средствами (ТС). При помощи различных алгоритмов, современной датчиковой аппаратуры и приводов появилась возможность с высокой точностью и быстродействием управлять агрегатами автомобиля.

К таким системам, помогающим водителю в управлении ТС, относятся системы, использующие различные алгоритмы автоматического следования по траектории, обеспечивающие высокую точность движения машины. Их работа основана на использовании датчиков для анализа дорожной обстановки и принятия решений об управлении.

Особенности работы системы управления автоматическим движением колесной машины

В качестве управляющих структур, обеспечивающих движение автомобиля по опорной траектории, используются различные регуляторы, поддерживающие стабильное управления автомобилем.

В ходе анализа был рассмотрен ряд регуляторов таких как: Follow the Carrot [1], Stanley [2], Follow the Past [3], Pure Pursuit [4, 5]. Все они основаны на кинематических соотношениях поворота автомобиля в соответствии с геометрией рулевого управления.

В качестве базового регулятора из приведенных выше примеров был выбран Pure Pursuit, так как у данного алгоритма есть ряд преимуществ:

- характерен для машины с кинематическим управлением поворотом;
- позволяет обеспечить наиболее точное следование колесной машины (КМ) по заданной траектории.

Алгоритм Pure Pursuit заключается в геометрическом вычислении кривизны дуги окружности, которая соединяет местоположение КМ с целевой точкой на траектории впереди ТС. Целевая точка определяется на основе прогнозируемого расстояния l_d от текущего положения КМ до точки слежения на желаемой траектории. Расчетная схема, применяемая в рамках алгоритма Pure Pursuit показана на рис. 1.

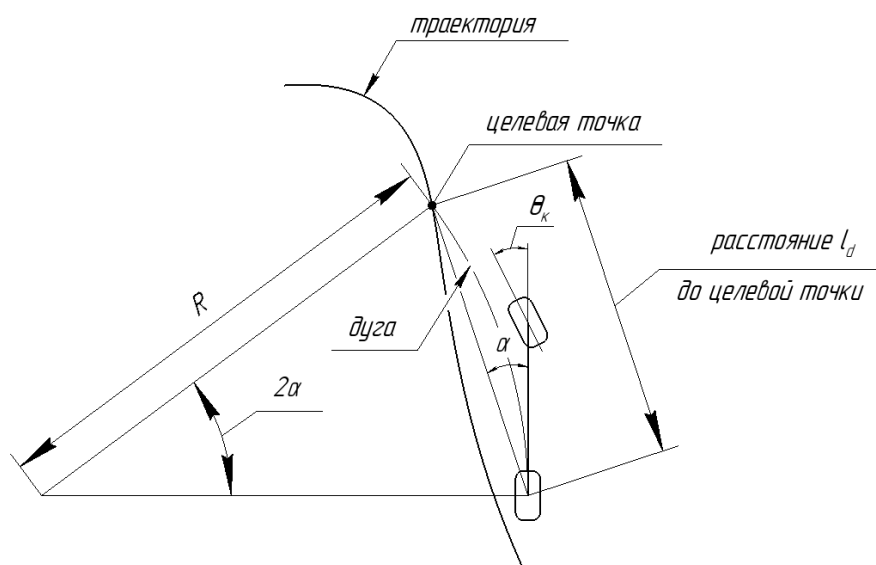


Рис.1. Расчетная схема, применяемая в рамках алгоритма Pure Pursuit

Угол поворота θ_k управляемых колес ТС можно определить, используя только местоположение целевой точки и угол α между продольной осью ТС и вектором l_d («look ahead distant»).

Оценка требуемого угла поворота управляемых колес в соответствии с алгоритмом Pure Pursuit (формула (1)):

$$\theta_k(t) = \arctg\left(\frac{2L\sin(\alpha(t))}{l_d}\right), \quad (1)$$

где L – колесная база;

l_d – расстояние до целевой точки;

α – угол между продольной осью ТС и вектором «look ahead distant».

В данном алгоритме управления учитывается поведение водителя: при движении на высоких скоростях происходит сужение поля зрения, поскольку водитель фокусируется на более удаленных участках пути для заблаговременной оценки быстро меняющейся дорожной обстановки.

Для воспроизведения данного адаптивного механизма предложено новое решение в виде динамического изменения расстояния до целевой точки l_d в зависимости от текущей скорости движения КМ.

В связи с тем, что при увеличении скорости движения машины в повороте возрастают центробежные силы и, соответственно, углы увода колес, при выполнении высокоскоростных маневров теоретический радиус поворота и его центр существенно отклоняются от кинематически полученных значений. Таким образом, для повышения точности следования заданной траектории при движении на высоких скоростях в алгоритм управления предлагается ввести корректирующий коэффициент k , который должен быть выбран также в зависимости от скорости движения КМ.

Определение положения колесной машины и его корректировка относительно заданной траектории

Путь, пройденный КМ s_{korp} , рассчитывается по формуле (2):

$$s_{korp} = \int \sqrt{v_x^2 + v_y^2} dt, \quad (2)$$

где v_x, v_y – проекции скорости центра масс КМ на оси координат xCy .

Для определения ближайшей к ТС точки на траектории, необходим массив, описывающий путь, пройденный от начала маршрута до каждой точки на траектории. Соответственно при помощи массивов x_{arr} и y_{arr} (координат точек траектории), рассчитываем массив путей s_{arr} по формуле (3):

$$s_{arr(i)} = \sqrt{(x_{arr(i)} - x_{arr(i-1)})^2 + (y_{arr(i)} - y_{arr(i-1)})^2} + s_{arr(i-1)}, \quad (3)$$

где i – номер точки на траектории;

x_{arr}, y_{arr} – массив координат путевых точек.

Исходя из допущения, что беспилотная машина должна эксплуатироваться в закрытой области, предполагается возможность корректного определения её положения относительно маршрута при помощи сравнения пройденного пути. Зная путь до каждой точки из массива s_{arr} (формула (3)), а также путь, пройденный КМ s_{korp} (формула (2)), возможно определить ближайшее положение КМ на траектории, при условии движения КМ по заданному маршруту без отклонений.

Однако при движении КМ в каждый момент времени необходима корректировка ее положения, так как в процессе движения возможно отклонение от заданного пути. Если координаты $(x_{korp}; y_{korp})$ КМ, не совпадают с координатами предполагаемой точки $(x_{arr(i)}; y_{arr(i)})$, лежащей на траектории (рис. 2), следует определить действительную ближайшую точку на траектории по отношению к КМ для возвращения машины на заданный маршрут движения.

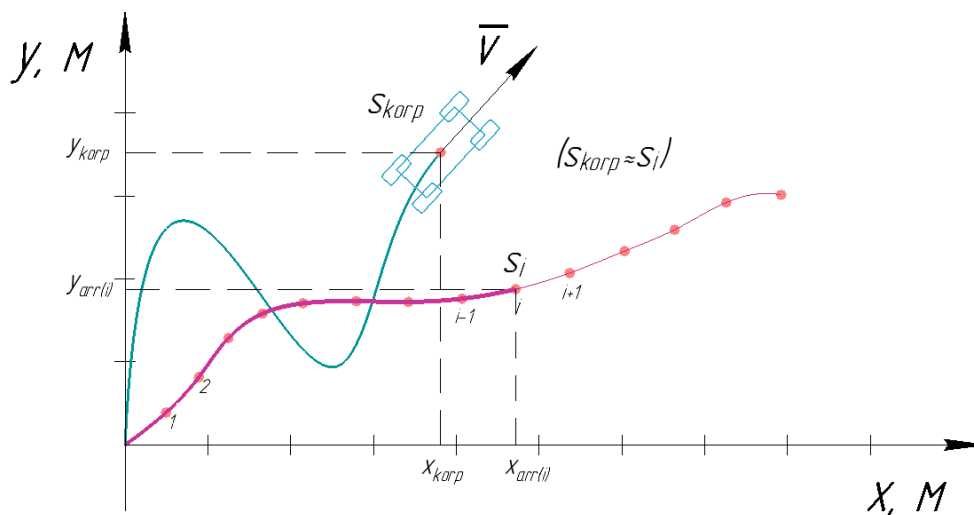


Рис.2. Пример отклонения от траектории

Для корректировки маршрута требуется найти наименьшее расстояние от КМ до точек траектории. Для ускорения процесса последовательно рассматриваются номера точек с шагом +1 или -1 по отношению к текущей путевой точке i (рис. 3). Выбор направления шага определяется путем сравнения расстояний. Сравнение расстояний осуществляется последовательным перебором (рис. 4), с целью нахождения точки траектории с наименьшим расстоянием до КМ, начиная от точки с координатами $(x_{arr(i)}; y_{arr(i)})$.

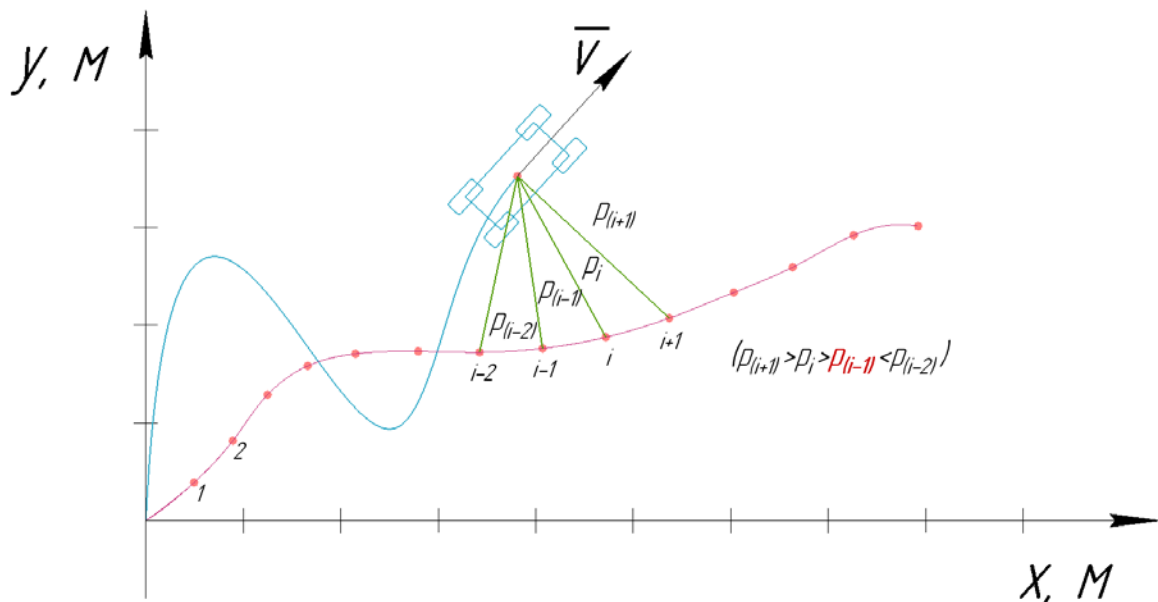


Рис.3. Нахождения ближайшей точки на траектории

После нахождения ближайшей точки на траектории на расстояние l_d вперед от нее откладывается целевая точка $(x_{arr(j)}; y_{arr(j)})$, к которой в итоге будет стремиться КМ. Таким образом, местонахождение целевой точки определяется в течение всего времени заезда (рис. 4).

Определение зависимости коэффициентов l_d и k от параметров движения колесной машины

Дальнейшие вычисления угла поворота КМ проводятся в соответствии с базовым алгоритмом Pure Pursuit, однако предполагается повысить точность следования траектории за счёт введения дополнительного коэффициента k , а также варьирования значения расстояния l_d в зависимости от скорости КМ (формула (4)):

$$\delta(t) = k(v) \cdot \arctg \left(\frac{(2L \sin(\alpha(t)))}{l_d(v)} \right). \quad (4)$$

В качестве объекта исследования была выбрана КМ с характеристиками, указанными в табл. 1. Виртуальные испытания проводились с использованием математической модели динамики КМ, реализованной в программной среде Matlab Simulink и основанной на уравнениях движения, представленных в работе [6].

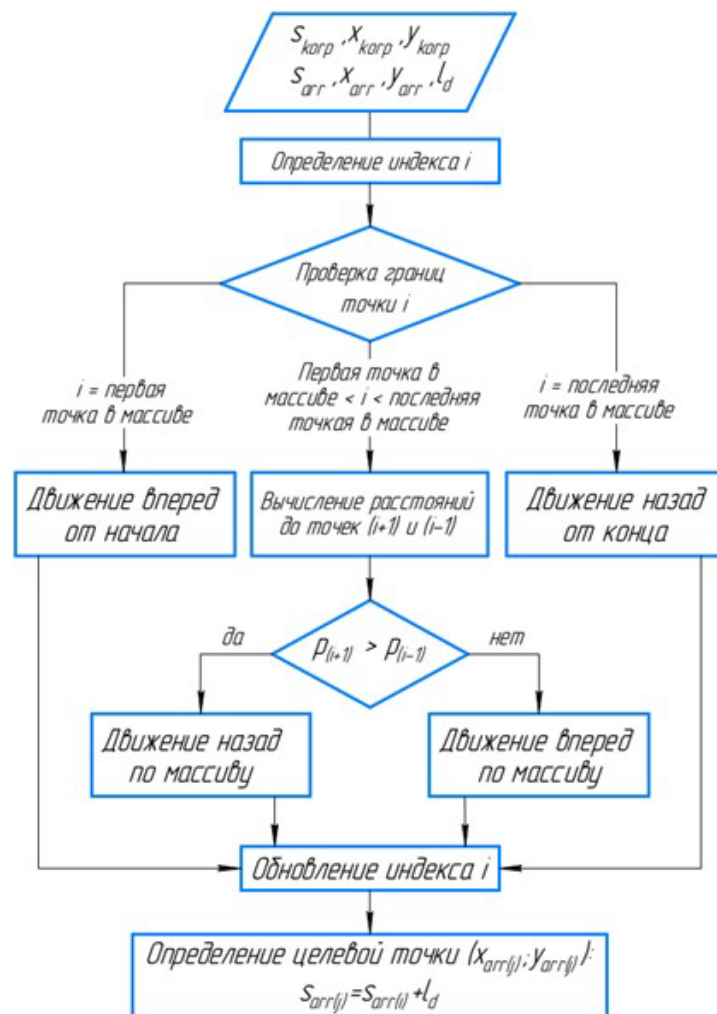


Рис.4. Блок-схема алгоритма для определения целевой точки на траектории

Таблица 1. Технические характеристики объекта исследования

Параметр	Значение
Масса корпуса машины, кг	1770
База, м	2,424
Колея, м	1,525
Вертикальная координата центра масс, м	0,746
Высота центра парусности, м	0,746
Момент инерции корпуса отн. вертикальной оси, кг · м ²	1209
Свободный радиус колеса, м	0,27
Момент инерции колеса, кг · м ²	1,822
Радиус ведущего колеса, м	0,27
Максимальный момент силовой установки, приведенный к колесу, Н · м	3749,3
Максимальная мощность двигателя, кВт	110
Максимальные обороты, об/мин	10000

Для начала проведем серию виртуальных заездов при постоянной скорости движения КМ равной 30 км/ч и при изменяющемся параметре l_d . За критерий оценки качества выполнения маневра принимается максимальное отклонение от заданной траектории. Результаты заездов с различными значениями l_d представлены на рис. 5.

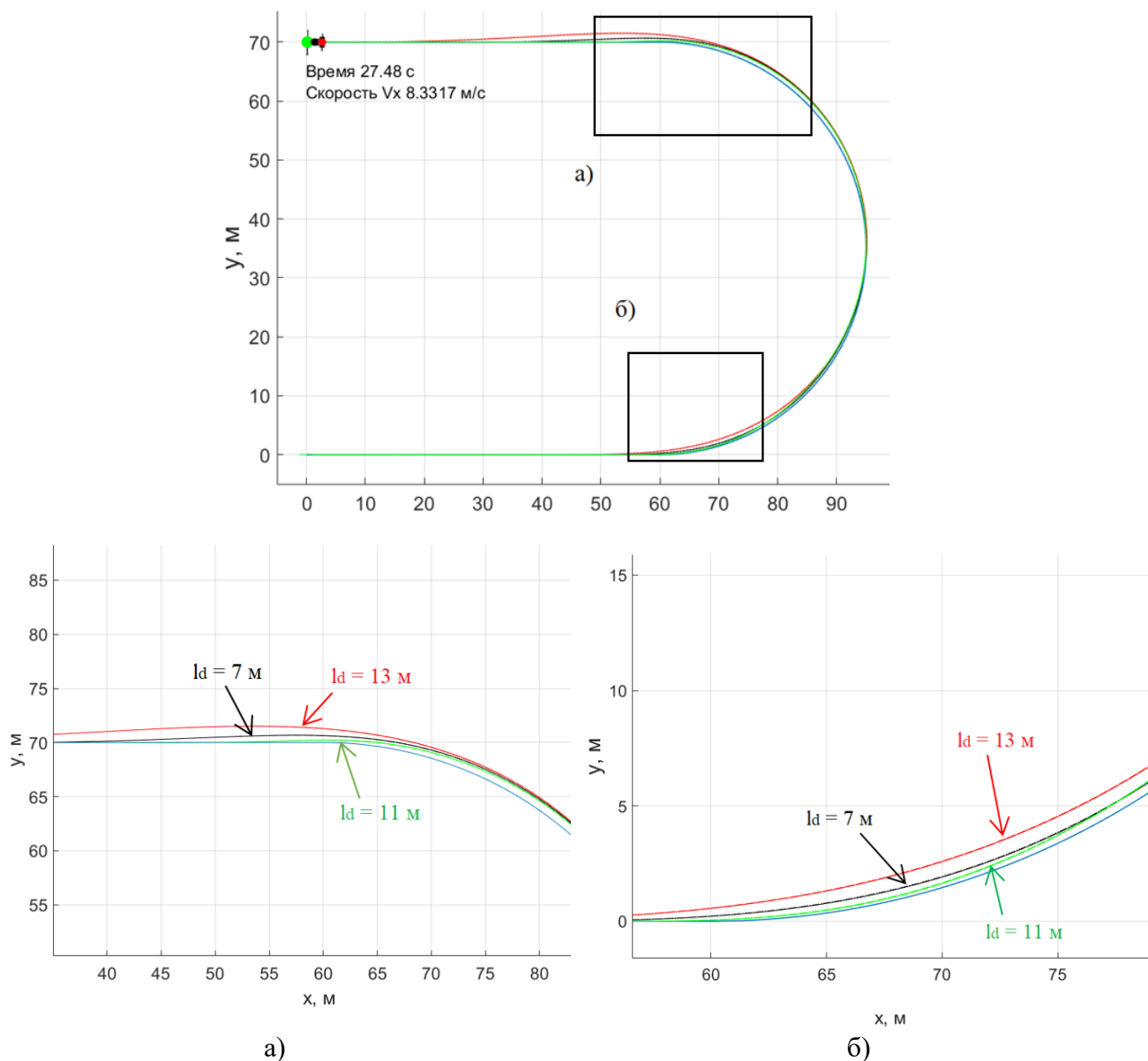


Рис.5. Результат заездов с различными значениями l_d ($l_d = 7$ м – черный, $l_d = 11$ м – зеленый, $l_d = 13$ м – красный)

На графиках видно, что наибольшая точность следования траектории КМ соответствует значению l_d равному 7 м. Таким образом, проводя серию заездов, можно подобрать для каждой скорости КМ свое значение l_d , обеспечивающее минимальное отклонение от заданной траектории (рис. 6).

Представленный график строится на основании заездов КМ, полученных на асфальтобетонном покрытии с коэффициентом сцепления $\varphi = 0,8$. Выбор данного значения обусловлен предположением об эксплуатации машины в подготовленной среде с качественным дорожным покрытием.

Также как для параметра l_d можно построить график изменения влияния скорости КМ на значение коэффициента k (рис. 7).

Параметры l_d и k оцениваются исходя от измеряемых параметров – теоретической скорости движения КМ.

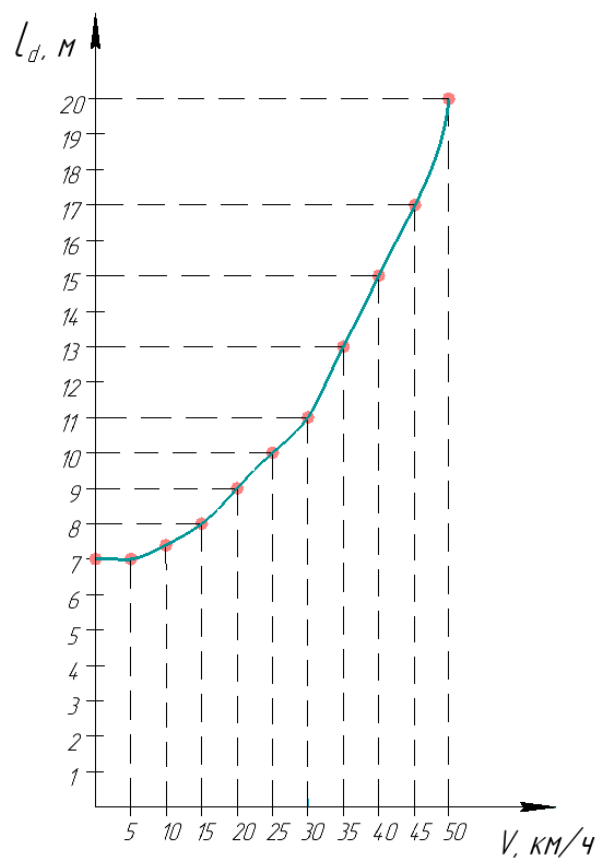


Рис.6. Зависимость параметра l_d от скорости движения КМ по опорной поверхности с коэффициентом сцепления равным $\varphi = 0,8$

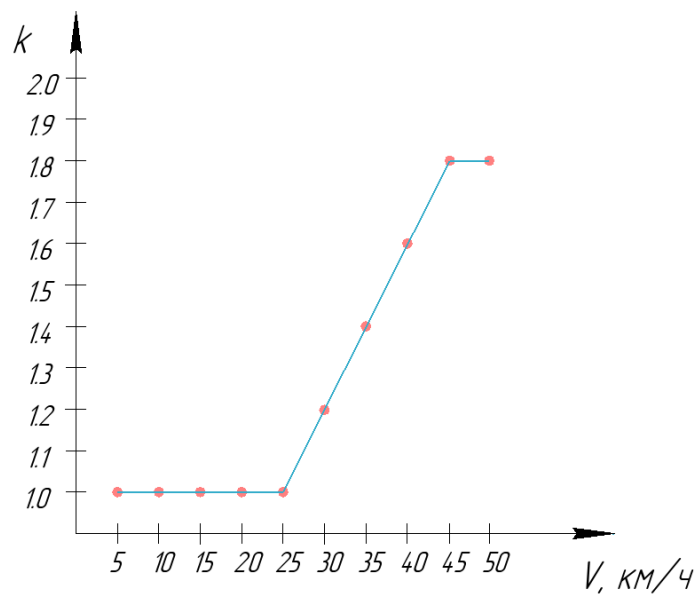


Рис.7. Зависимость коэффициента k от скорости движения КМ по опорной поверхности с коэффициентом сцепления равным $\varphi = 0,8$

Оценка эффективности алгоритма управления с переменными параметрами

Проверим эффективность разработанного алгоритма на примере движения КМ по траектории типа «змейка» (рис. 8).

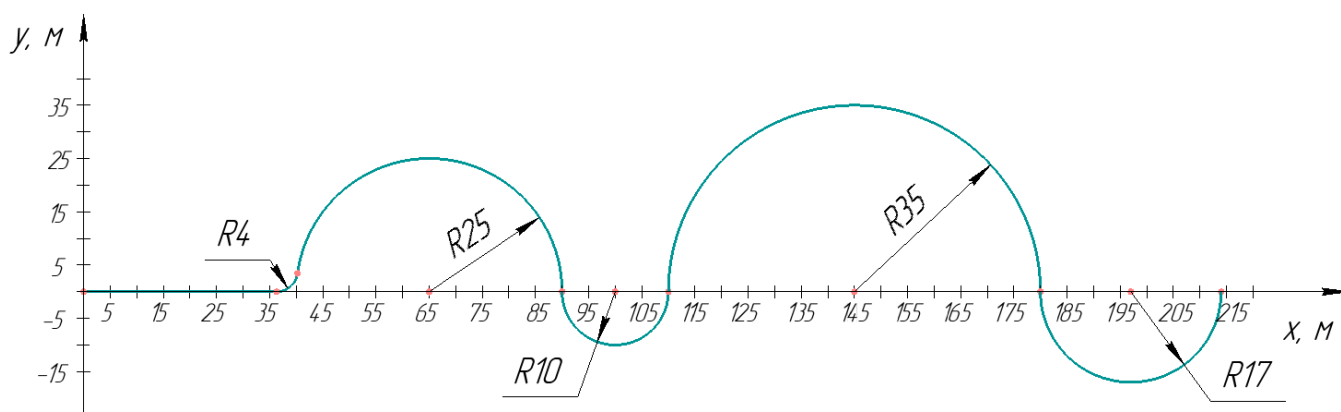


Рис.8. Траектория типа «змейка»

Зависимость поддерживаемой скорости движения по трассе выбрана, исходя из ограничения 0,5 от заносной скорости при движении в повороте (формула (5)):

$$v_{\text{мх}}^{\text{занос}} = \sqrt{R_{\text{п}} g \varphi}, \quad (5)$$

где $R_{\text{п}}$ – радиус кривизны траектории;

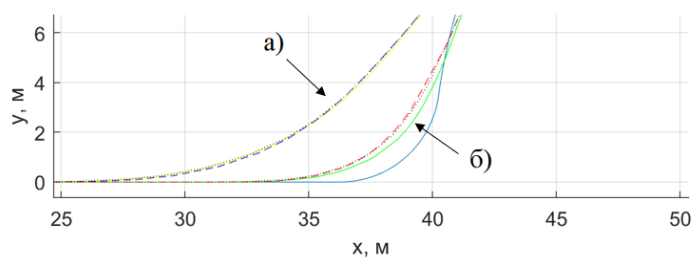
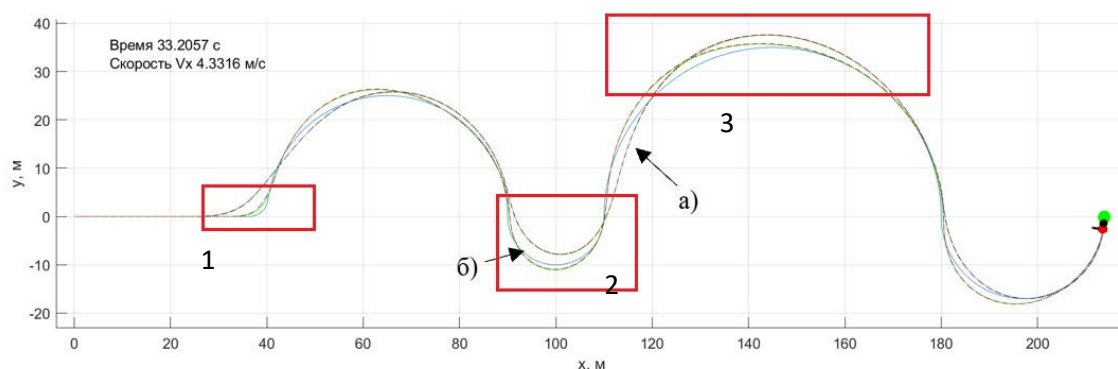
φ – коэффициент сцепления;

g – ускорение свободного падения.

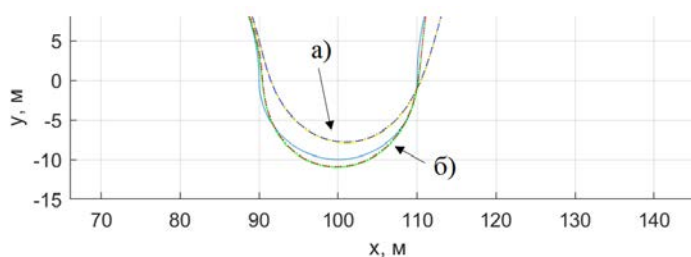
Проведем сравнение движения КМ с регулятором с фиксированными параметрами, характерными для средней скорости движения КМ, и с переменными параметрами (рис. 9).

Фиксированные параметры регулятора были рассчитаны для движения на средней скорости, характерной для поворота радиусом 30 метров на ОП с коэффициентом сцепления равным 0,8. Данная скорость была принята равной половине от расчетной заносной скорости для указанных условий.

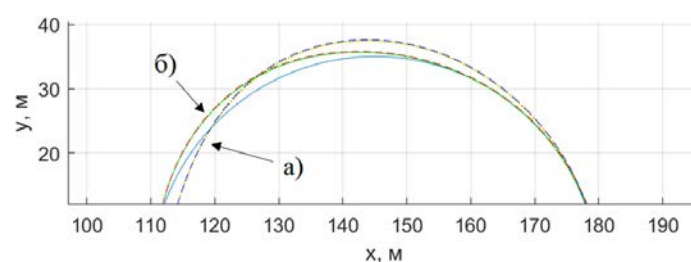
Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что при движении с переменными параметрами l_d и k максимальное отклонение от траектории снизилось на 75 %, что позволило повысить точность следования машиной заданной траектории.



1



2



3

Рис.9. Траектория движения модели: а) с постоянными параметрами; б) с переменными параметрами

Заключение

В ходе исследовательской работы был усовершенствован алгоритм системы управления автоматическим движением КМ по заданной траектории, базирующийся на методе Pure Pursuit. Модификация алгоритма осуществлялась путем введения адаптивных параметров – расстояния до целевой точки l_d и корректирующего коэффициента k , зависящих от скорости движения колесной машины. Оценка эффективности улучшенного алгоритма управления проводилась по результатам виртуальных испытаний на траектории типа «змейка», которые подтвердили повышение точности следования траектории на 75 %.

Список литературы

1. Barton M. J. Controller Development and Implementation for Path Planning and Following in an Autonomous Urban Vehicle: Bachelor of Engineering (Mechatronics) – M: Australian Centre for Field Robotics, 2001. – 153 p.
 2. Thrun S., Montemerlo M., Dahlkamp H., Stavens D., Aron A., Diebel J., Fong P., Gale J., Halpenny M., Hoffmann G. Stanley: The robot that won the darpa grand challenge // Journal of field Robotics. Vol. 23. – 2006. - N 9. – P. 661–692.
 3. Hellström T., Ringdahl O. Follow the Past: a path-tracking algorithm for autonomous vehicles // International Journal of Vehicle Autonomous Systems. Vol. 4. – 2006. – P. 216-224.
 4. Coulter R. Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm: technical report / Coulter R. C. – Carnegie Mellon University, 1992. – 15 p.
 5. Snider J.M. Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking // Carnegie Mellon University. – 2009. – 78 p.
 6. Косицын Б.Б. Научные методы повышения подвижности боевых колесных машин путем совершенствования тормозных свойств: дис. ...докт. техн. наук: 05.05.03. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. – 280 с.
-

АВТОРЫ

Бякова Анастасия Александровна, кафедра «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), аспирант, bratchina@bmstu.ru.

Бяков Константин Евгеньевич, кафедра «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), кандидат технических наук, доцент, byakov@bmstu.ru.

Комиссаров Александр Игоревич, кафедра «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), кандидат технических наук, доцент, kommisarov@bmstu.ru

The algorithm of the control system for the automatic movement of a wheeled vehicle along a given trajectory

Anastasia A. Byakova*,
Konstantin E. Byakov,
Aleksandr I. Komissarov

*bratchina@bmstu.ru
Bauman Moscow State Technical University
(Moscow, Russia)

The research is devoted to the development of an algorithm for controlling the automatic movement of a wheeled vehicle along a given trajectory. The object of the study is a two-axle car with an automatic motion control system along a given trajectory. The aim of the work is to increase the accuracy of the automatic movement of a wheeled vehicle along a given trajectory by developing a rational control algorithm. As a result of the research, the effectiveness of the control algorithm, which ensures the movement of a wheeled vehicle along a given trajectory, was evaluated.

Keywords: automatic movement, control algorithm, curved trajectory, pure pursuit, sensors, target point.

References

1. M. J. Controller Development and Implementation for Path Planning and Following in an Autonomous Urban Vehicle: Bachelor of Engineering (Mechatronics) – Moscow: Australian Centre for Field Robotics, 2001. – 153 p.
2. Thrun S., Montemerlo M., Dahlkamp H., Stavens D., Aron A., Diebel J., Fong P., Gale J., Halpenny M., Hoffmann G. Stanley: The robot that won the darpa grand challenge // Journal of field Robotics. Vol. 23. – 2006. - N 9. – P. 661–692.
3. Hellström T., Ringdahl O. Follow the Past: a path-tracking algorithm for autonomous vehicles // International Journal of Vehicle Autonomous Systems. Vol. 4. – 2006. – P. 216-224.
4. Coulter R. Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm: technical report / Coulter R. C. – Carnegie Mellon University, 1992. – 15 p.
5. Snider J.M. Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking // Carnegie Mellon University. – 2009. – 78 p.
6. Kositsyn B. B. Scientific methods of increasing the mobility of wheeled combat vehicles by improving braking properties: dissertation. Technical Sciences: 05.05.03. Moscow: Bauman Moscow State Technical University. 2017. 280 p.

AUTHORS

Anastasia A. Byakova, Department of Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University, (5, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005 1), postgraduate student, bratchina@bmstu.ru .

Konstantin E. Byakov, Department of Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots Bauman Moscow State Technical University, (5, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005 1), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, byakov@bmstu.ru.

Aleksandr I. Komissarov, Department of Multipurpose Tracked Vehicles and Mobile Robots, Bauman Moscow State Technical University, (5, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005 1), Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, komissarov@bmstu.ru
