

**УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО
АВТОМОБИЛЯ ПО ЗАДАННОЙ ТРОЕКТОРИИ
С УЧЕТОМ БОКОВОГО УВОДА ШИН**

UNMANNED VEHICLE DRIVING CONTROL BY A GIVEN
TRAJECTORY WITH ACCOUNTING OF TIRE SIDE SLIPS

Ле Ван Нгиа¹, канд. техн. наук, **Кусяк В. А.**², канд. техн. наук, доц.,

¹Институт Механики, Ханойский Университет Техники и Науки,
г. Ханой, Вьетнам

²Филиал БНТУ «Научно-исследовательский Политехнический Ин-
ститут», Белорусский Национальный Технический Университет,
г. Минск, Республика Беларусь

Le Van Nghia¹, Ph.D. in Engineering,

V. Kusyak², Ph.D. in Engineering, Associate Professor,

¹School of Mechanical Engineering, Hanoi University
of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

²Polytechnic Research Institute, Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus

В работе описываются динамика рулевой системы автомобиля с учетом боковых уводов шин и алгоритм управления поворотом управляемых колес при движении беспилотного автомобиля по заданной траектории. Приводятся результаты моделирования процесса поворота управляемыми колесами на основе комбинированного алгоритма с элементами математического прогнозирования второго порядка и ПИД-регулированием. Проведено сопоставление полученных результатов с рекомендуемыми значениями отклонений стандарта SAE от заданных траекторий движения в беспилотном режиме.

The paper presents the dynamic of the vehicle steering system on accounting tire side slip and the steering wheel control algorithm at the unmanned vehicle moves by a given trajectory. The results of simulation the steered wheels turning process based on a combined algorithm with the mathematical elements of the second order prediction and PID regulation are given in activities. A comparison of the obtained results with

the SAE recommended deviations values from the given movement trajectories in unmanned mode are presented.

Ключевые слова: беспилотный автомобиль, управление движением автомобиля, динамика рулевой системы, алгоритмы управления управляемыми колесами.

Keywords: unmaned vehicle, vehicle motion control, steering system dynamic, algorithms of steering wheels control.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий по управлению сложными техническими объектами обуславливает применение микропроцессорных мехатронных систем в автомобилях. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является беспилотное управление автотранспортным средством, предусматривающее не только автоматизацию силового агрегата автомобиля, но и оснащение рулевого управления исполнительными механизмами и программно-аппаратной платформой для взаимодействия мобильного JPS-терминала со спутниковой навигационной системой. При разработке автоматизированных мехатронных систем данного класса одну из важнейших задач представляет собой разработка алгоритмов управления рулевой системой. В работе представлена стратегия управления управляемыми колесами при движении беспилотного автомобиля по заданной траектории на основе комбинированного алгоритма с ПИД-регулированием и прогнозированием второго порядка, а также результаты моделирования данного процесса на основе предлагаемого алгоритма.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Ключевым элементом беспилотных автомобилей является система наблюдения и анализа окружающей обстановки. Полученная информация от внешних дорожных и бортовых датчиков, наряду с сигналами от орбитальной спутниковой системы, используются электронным блоком управления для формирования оптимальной траектории движения автомобиля. При заданной траектории исполнительные механизмы мехатронной системы воздействуют на элементы рулевого управления таким образом, чтобы обеспечить движение автомобиля по этой траектории с минимальными отклонениями. Причем для достижения рекомендуемых отклонений по траек-

тории [1] требуется разработка комплексного алгоритма управления поворотом колес, учитывающего динамику рулевой системы с учетом бокового увода шин. В данной работе использовалась двухколесная модель автомобиля (рисунок 1).

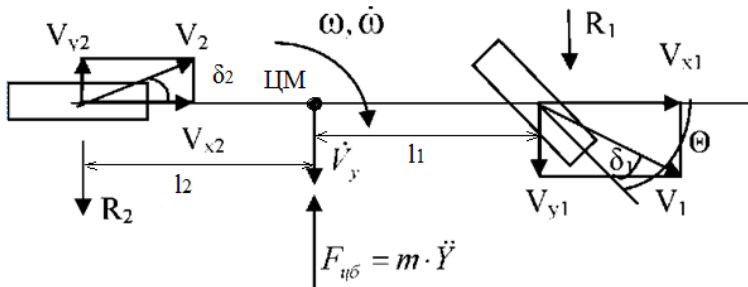


Рисунок 1. – Двухколесная модель автомобиля

δ_1, δ_2 - углы увода шин автомобиля, R_1, R_2 - боковые реакции шин, V_1, V_{x1}, V_{y1} - действительная, продольная и поперечная скорость управляемого колеса, V_2, V_{x2}, V_{y2} - действительная, продольная и поперечная скорость заднего колеса, ЦМ – центр масс автомобиля, l_1, l_2 – расстояния от центра масс до передней и задней оси, ω – угол поворота автомобиля вокруг центра масс

Математическое описание данной модели представлено следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= V_x \cdot \psi + V_y, \\ \dot{\psi} &= \omega, \\ \dot{V}_y + \frac{k_1 + k_2}{m \cdot V_x} V_y + \frac{m \cdot V_x^2 + k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2}{m \cdot V_x} \cdot \omega &= \frac{k_1 \cdot \theta}{m}, \\ \dot{\omega} + \frac{k_1 \cdot l_1 - k_2 \cdot l_2}{J_z \cdot V_x} \cdot V_y + \frac{k_1 \cdot l_1^2 + k_2 \cdot l_2^2}{J_z \cdot V_x} \cdot \omega &= \frac{k_1 \cdot l_1 \cdot \theta}{J_z}. \end{aligned}$$

где k_1, k_2 – коэффициенты увода шин автомобиля, θ – угол поворота управляемых колес автомобиля, J_z – момент инерции автомобиля, m – масса автомобиля.

В настоящее время известны и широко применяются на практике при отработке алгоритмов управления поворотом управляемых ко-

лес так называемые «компенсационные модели слежения» [2] и «прогнозируемые модели» [3]. В данной работе при проведении исследований применялся алгоритм управления поворотом управляемых колес, основанный на комбинированной модели, включающей математические элементы прогнозирования второго порядка и аспекты ПИД-регулирования.

По компенсационной модели угол поворота управляемых колес автомобиля определяется по формуле:

$$\theta(t) = K_2 \cdot y_d(t) + K_d \cdot \dot{y}_d(t) + K_1 \cdot \int_0^t \dot{y}_d(\tau) \cdot d\tau + K \cdot (y_d(t + T_p - t_d) - T_p \cdot \dot{y}_d(t - t_d) - T_p^2 \cdot \ddot{y}_d(t - t_d) / 2),$$

где K_2 , K_d , K_1 – коэффициенты ПИД-регулирования, K – коэффициент усиления модели прогнозирования второго порядка, определяется экспериментальным путем для каждой модели автомобиля при определенном маневре, $T_p = 1$ с – время прогноза, $t_d = 0,05$ с – запаздывание системы, y_d – желаемая поперечная координата.

В качестве объекта исследования использовался легкий грузовой автомобиль VEAM-FOX-TP-1.5 T, основные параметры которого приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные параметры объекта исследования

Параметры	Значения
Полная масса, кг	3000
Базовая длина, м	2,6
Расстояние от центра масс до переднего моста, м	1,3
Расстояние от центра масс до заднего моста, м	1,3
Шины передние и задние	6.50–16/5.50–13
Коэффициент увода шин, Н/рад	30000
Момент инерции автомобиля относительно вертикальной оси, кг·м ²	2500

При проведении машинного эксперимента по отработке предлагаемого комбинированного алгоритма поворота управляемых колес в качестве заданной («желаемой») траектории было выбрано движение автомобиля по кругу. Результаты компьютерного моделирования исследуемого процесса представлены на рисунках 2 и 3.

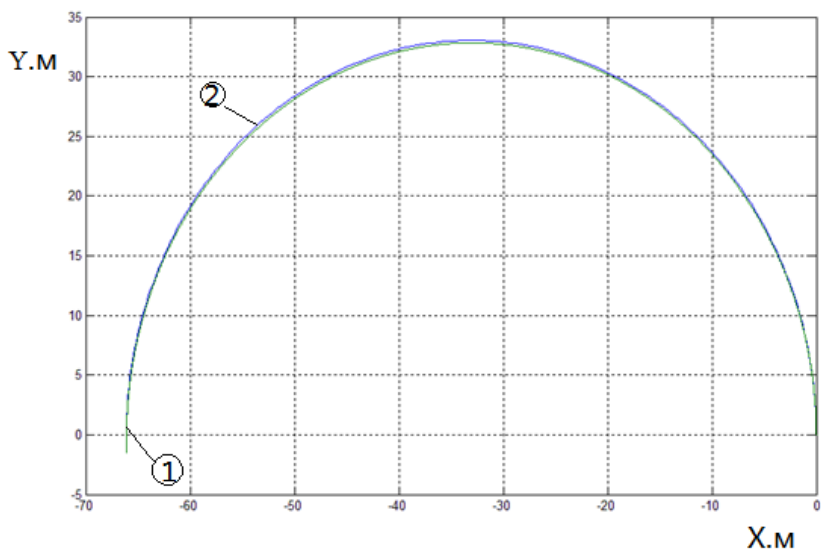


Рисунок 2 – Заданная (1) и реализованная (2) траектории

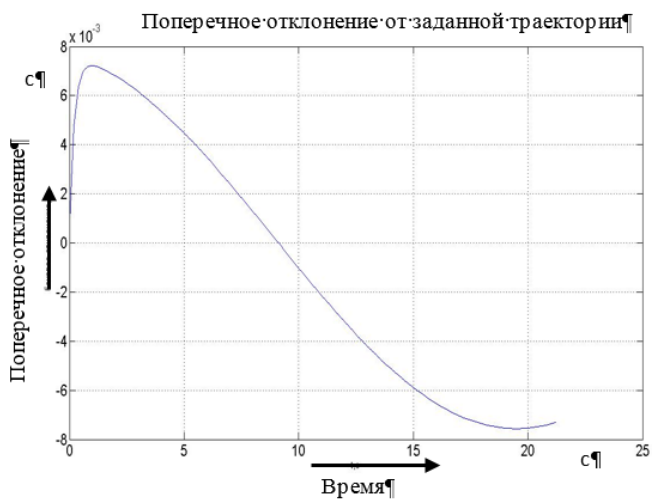


Рисунок 3 – Боковое отклонение от заданной траектории

Как видно из результатов моделирования, поперечное отклонение реализованной от заданной («желаемой») траектории при движении

автомобиля по кругу не превышает 8 мм (рекомендации SAE – 150 мм), что подтверждает работоспособность предлагаемого комбинированного алгоритма и возможность его использования для других видов траекторий движения при беспилотном управлении транспортным средством.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения машинного эксперимента подтверждена работоспособность предлагаемого алгоритма управления рулевой системой при движении автомобиля по заданной траектории в беспилотном режиме. Как показали результаты исследований использование комбинированного алгоритма с элементами математического прогнозирования второго порядка и ПИД-регулированием, наряду с учётом бокового увода шин в управляющей программе контроллера, обеспечивают при движении беспилотного автомобиля по кругу поперечное отклонение траектории от заданной в пределах 8 мм, что не превышает предельных значений, регламентированных рекомендациями SAE.

ЛИТЕРАТУРА

1. Autonomous Driving Based on Accurate Localization Using Multi-layer LiDAR and Dead Reckoning / Akai Naoki [etc.] / IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems At. – Yokohama, Japan. October 2017. – 7 p.
2. Guo, K. Modeling of driver/vehicle directional control system / K. Guo, H. Guan // Vehicle System Dynamics. – 1993. – № 22. – P. 141–184.
3. MacAdam, C. C. An Optimal Preview Control for Linear Systems / C. C. MacAdam // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1980. – Vol. 22 – P. 188–191.

Представлено 20.05.2022