УДК 681.515.8

DOI 10.35211/1990-5297-2021-9-256-37-41

М. В. Ляшенко, В. В. Шеховцов, П. В. Потапов, А. А. Шведуненко

**СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ
СПЕЦИАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Волгоградский государственный технический университет
ts@vstu.ru

На основе динамических уравнений математической модели специального транспортного средства (СТС) смоделирована система стабилизации движения при перемещении по прямой поверхности. Стабилизация движения осуществляется при помощи применения ПИД-регулятора, угловое смещение массы подбирается для обеспечения заданной скорости движения, а стабилизация угла отклонения происходит за счет управления крутящим моментом двигателя.

Ключевые слова: стабилизация движения, ПИД-регулятор, перевернутый маятник.

© Ляшенко М. В., Шеховцов В. В., Потапов П. В., Шведуненко А. А., 2021.

M. V. Lyashenko, V. V. Shekhovtsov, P. V. Potapov, A. A. Shvedunenko

SPECIAL VEHICLE MOTION STABILIZATION SYSTEM

Volgograd State Technical University

The system of special vehicle (SV) motion stabilization during moving on a straight surface is modeled on the base of dynamic equations of the mathematical model. The movement is stabilized by using a PID controller, the angular displacement of the mass is selected to ensure a given speed of movement, and the deflection angle is stabilized by controlling the engine torque.

Keywords: motion stabilization, PID controller, inverted pendulum.

В современном обществе существует немало проблем, связанных с перемещением людей с ограниченными возможностями в повседневной жизни [1, 2]. Для решения данных проблем авторами была создана конструкция СТС, позволяющая перемещаться по различным видам поверхностей [3].

На основе модели данной конструкции был произведен анализ стабилизации движения по ровной поверхности на двух колесах движителя. Данная модель была преобразована в структурную для упрощения вычислений (рис. 1).

Рис. 1. Структурная схема СТС

Здесь m_1g – сила тяжести системы «водитель – сиденье»; mg – сила тяжести ходовой части СТС; φ – угол отклонения системы «водитель – сиденье» от вертикальной прямой; F_1 , F_2 – силы, приводящие в движение СТС; F_{mp1} , F_{mp2} – силы трения качения колеса; M_{mp} – момент трения в шарнире A; l – расстояние от шарнира A до центра масс системы «водитель – сиденье». Силы, приводящие в движение СТС, вычисляются по формуле (1).

$$F_1 = F_2 = \frac{M}{R}, \quad (1)$$

где R – радиус колеса; M – вращающий момент на колесе. Принято допущение, что колеса вращаются без проскальзывания.

Координаты центра масс системы «водитель – сиденье» (x_1 , y_1) в системе координат Axy (рис. 1) имеют вид

$$x_1 = x + l \sin(\varphi), \quad (4)$$

$$y_1 = y + l \cos(\varphi), \quad (5)$$

где x , y – текущие координаты точки A.

Используя второй закон Ньютона, получаем [4, 5]:

$$\ddot{x} = \frac{2M}{R} - 2\frac{\mu\dot{x}}{R} + \frac{m_1 l \sin(\varphi) \dot{\varphi}^2 - m_1 l \cos(\varphi) \ddot{\varphi}}{(m + m_1)}, \quad (6)$$

где $\ddot{x}$ – ускорение центра масс системы «водитель – сиденье».

Теперь принимаем теорему об изменении момента количества движения системы. Момент инерции системы «водитель – сиденье» обозначен через I . Угловой момент системы «водитель – сиденье» M_A складывается из членов, описывающих вращение вокруг неподвижной оси. Пока система вращается вокруг своего центра масс, момент инерции равен I . Но, поскольку у нас система вращается вокруг точки крепления, возникает второй член, учитывающий расстояние между точкой крепления и центром масс [6]. Таким образом, угловой момент принимает значение:

$$M_A = (I + m_1 l^2) \dot{\varphi}. \quad (7)$$

Вращательное движение системы вызывается действием двух сил: силы тяжести и силы, связанной с ускорением тележки. Действительно, тот факт, что СТС движется, означает, что со стороны ходовой части к системе приложена какая-то сила [6]. Момент силы тяжести равен $m_1 g l \sin \varphi$, а момент силы, связанной с ускорением СТС, равен $m_1 \ddot{x} l \cos \varphi$.

Как гласит теорема об изменении момента количества движения системы, производная углового момента по времени равна моменту сил, приложенных к системе. В итоге мы получаем:

$$(I + m_1 l^2) \ddot{\varphi} = m_1 g l \sin(\varphi) - m_1 \ddot{x} l \cos(\varphi) - M_{mp};$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{m_1 g l \sin \varphi - m_1 \ddot{x} l \cos \varphi - c \dot{\varphi}}{I + m_1 l^2}. \quad (8)$$

После получения динамических уравнений системы анализируем ее поведение в программном комплексе Simulink [7]. При помощи созданной трехмерной модели СТС, и опираясь на ее анализ в программной среде Solidworks, удалось определить геометрические и физические характеристики СТС, необходимые для расчетов.

На основе динамических уравнений системы была создана математическая модель в про-

граммной среде Simulink. Для стабилизации движения СТС в программной среде Simulink при помощи ПИД-регулятора была осуществлена стабилизация движения путем сохранения угла отклонения СТС от вертикальной линии на заданный угол, равный 15 градусам. В качестве регулятора положения СТС относительно вертикальной линии был выбран ПИД-регулятор (рис. 2), который, воздействуя на крутящий момент двигателя, стабилизировал положения центра масс СТС. Были подобраны наиболее оптимальные коэффициенты ПИД-регулятора для различных режимов движения СТС с точки зрения скорости стабилизации и ошибки.

Рис. 2. Характеристики ПИД-регулятора

Стабилизация движения осуществляется при помощи применения ПИД-регулятора с подобранными коэффициентами. Угловое смещение массы подбирается для обеспечения заданной скорости движения, а стабилизация угла отклонения происходит за счет управления крутящим моментом двигателя. Было смоделировано движение СТС в четырех скоростных

режимах. Режим движения зависел от необходимой скорости перемещения СТС, в данной работе испытывалась система стабилизации движения СТС с заданными скоростями 0,5 м/с; 1 м/с; 1,5 м/с и 2 м/с.

По результатам исследования удалось получить следующие зависимости:

Рис. 3. Зависимость крутящего момента от времени

Рис. 4. Зависимость изменения угла отклонения системы «водитель – сиденье» от вертикальной линии у от времени

Рис. 5. Зависимость скорости перемещения от времени

Для более детального изучения воздействия крутящего момента для стабилизации движения СТС, а именно для поддержания водителя с сиденьем в безопасном вертикальном

положении, представлена зависимость крутящего момента от времени на промежутке от 10 до 11 секунды от времени (рис. 6).

Рис. 6. Зависимость крутящего момента от времени на промежутке от 10 до 11 секунды от времени

Было проведено моделирование работы системы стабилизации движения СТС на различных скоростных режимах, которая доказала свою работоспособность. Выбранный для решения данной задачи ПИД-регулятор обеспечивает требуемую эффективность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проблемы инвалидов при передвижении на креслах-колясках в жилом помещении и объектах социальной инфраструктуры / О. Н. Владимирова, Т. Н. Шеломанова, И. Е. Македонова, М. В. Рохманова, О. А. Назаркина // Вестник Всероссийской гильдии протезистов-ортопедов. – 2012. – № 1–2 (47–48). – С. 54–57.
2. Конева, Т. Н. Окружающая среда в структуре качества жизни инвалидов-колясочников // Среднерусский вестник общественных наук. – 2018. – Т. 13. – № 2. – С. 50–60.
3. П. м. 202676 Российская Федерация, МПК А61G 5/06, В62D 57/024 Инвалидная коляска / М. В. Ляшенко, В. В. Шеховцов, П. В. Потапов, А. А. Шведуненко, А. И. Искалиев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2021.
4. Landry M., Campbell S.A., Morris K., Aguilar C. Dynamics of an inverted pendulum with delayed feedback control. SIAM J. Applied Dynamical Systems, 2005, vol. 4, no. 2, pp. 333–351. DOI: 10.1137/030600461.
5. Пастухова, Е. А. Исследование алгоритмов управления и построение математической модели перевернутого маятника / Е. А. Пастухова, М. А. Кондратенко, В. А. Федоров // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна : Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию Байбакова Николая Константиновича. – Тюменский индустриальный университет (Тюмень), 2011. – С. 361–364.
6. Фантонни, И. Нелинейное управление механическими системами с дефицитом управляющих воздействий / И. Фантонни, Р. Лозано – Ижевск : Компьютерная динамика, 2012. – 312 с.
7. Юрьева, О. Д. Об управлении и стабилизации перевернутого математического маятника вертикальными силами / О. Д. Юрьева, А. В. Баунина // Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. – 2018. – № 1. – С. 123–130.