

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{u} = vr - wq + F_x / m; \\ \dot{v} = wp - ur + F_y / m; \\ \dot{w} = uq - vp + F_z / m; \\ \dot{p} = \frac{I_z M_x}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{I_{xz} M_y}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{(I_x - I_y + I_z) I_{xz}}{I_x I_z - I_{xz}^2} pq + \frac{(I_y - I_z) I_z - I_{xz}^2}{I_x I_z - I_{xz}^2} qr; \\ \dot{q} = \frac{M_y}{J_y} - \frac{(J_x - J_z) pr}{J_y} - \frac{J_{xz} (p^2 - r^2)}{J_y}; \\ \dot{r} = \frac{I_{xz} M_x}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{I_x M_y}{I_x I_z - I_{xz}^2} + \frac{(I_x^2 - I_y I_x + I_{xz}^2)}{I_x I_z - I_{xz}^2} pq + \frac{(I_y - I_x - I_z) I_{xz}}{I_x I_z - I_{xz}^2} qr. \end{array} \right.$$

Представленные уравнения описывают динамику несимметричного мультикоптера с учетом принятых допущений. Из системы уравнений движения аппарата следует частный случай – динамически симметричного мультикоптера ( $Oz$  – центральная ось динамической симметрии тела). Как видно, уравнения являются нелинейными и их точное решение с помощью аналитических методов и стандартных средств в общем случае невозможно.

Для численной оценки движения мультикоптера (гексакоптера), будет рассмотрена базовая модель, которая состоит из крестообразной несущей конструкции с шестью винтами, установленными на ее концах. Нечетные винты (роторы 1,3,5) вращаются против часовой стрелки, в то время как четные (роторы 2,4,6) вращаются по часовой стрелке. При проведении практических расчетов будем считать инерцию двигателей летательного аппарата малой, считая, что гироскопические силы роторов и винтов незначительные.

Заметим, что уравнения, описывающие движение мобильной мехатронной системы значительно упрощаются, если расположить систему координат  $Oxyz$  (строительные оси аппарата) по его главным осям инерции (при условии, что мы заранее вычислили направление главных осей инерции летательного аппарата).

Отметим, что расчеты показывают, что принятая вертикальная симметрия мультикоптера, при условии постоянства массы, дает численные значения  $I_{xz}$  значительно меньшие, чем  $I_x$ ,  $I_y$  и  $I_z$  (т.е.  $I_{xz}$  при проведении оценочных расчетов в дальнейшем можно будет в определенной степени пренебречь). Дальнейшее исследование уравнений движения мультикоптера, а также их решение осуществляется с использованием методов компьютерного моделирования (численное решение).

УДК 681.5

## УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ СКЛАДОВ

*Прокопеня О.Н., Никонов М.Н.*

Мобильные роботы широко применяются в промышленности. Известны различные системы навигации и способы управления движением данных роботов. Однако они, либо отличаются высокой сложностью, либо обеспечивают невысокую точность управления. Поэтому проблема создания эффективных систем управления движением мобильных роботов по-прежнему остается актуальной.

Требования к системе управления робота могут варьироваться в широких пределах в зависимости от выполняемой операции. В данной работе рассматривается робот для обслуживания склада готовой продукции. В этом случае траектория движения робота фактически является фиксированной. Фрагмент такой траектории показан на рисунке 1. Она может быть представлена прямолинейными участками и дугами окружности, которые сопрягаются друг с другом в опорных точках.

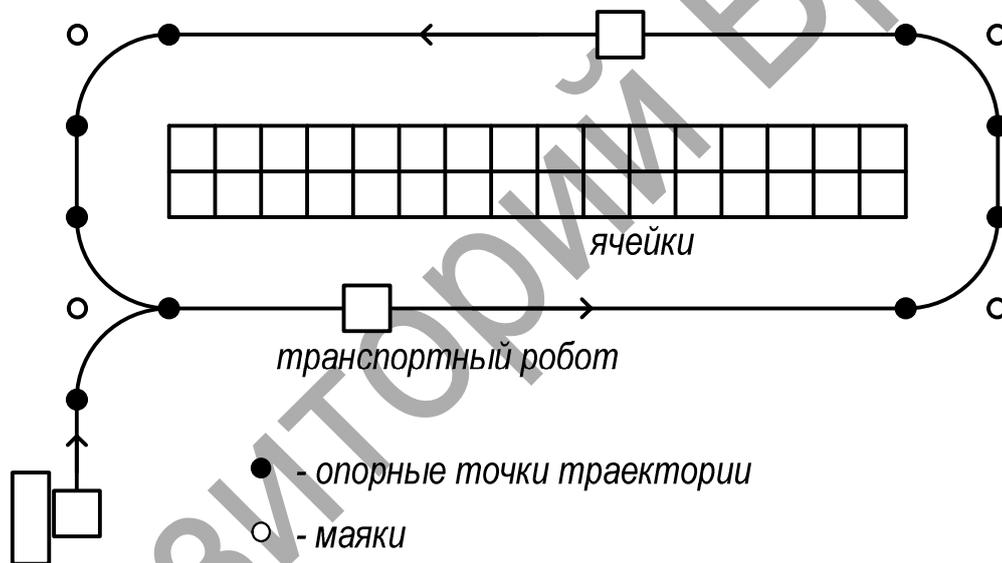


Рисунок 1 – Участок траектории движения робота

В подобных ситуациях часто траекторию задают с помощью цветной линии, магнитной проводки и другими аналогичными способами, что имеет свои недостатки. В данной работе решалась задача управления движением на основе информации от внутренних датчиков робота с минимальным использованием внешних средств. Так для движения по замкнутому контуру используется четыре маяка, установленные в угловых точках, как показано на рисунке 1. Это могут быть цветные маркеры, радиомаяки и т.п. Предполагается, что внутренние датчики позволяют определять расстояние до маяка и угол его отклонения от продольной оси робота. Алгоритм управления движением при этом может быть следующим. Оказавшись на прямолинейном участке траектории, робот фиксирует отклонение маяка от продольной оси и стремится свести это отклонение к нулю в процессе движения, т.е. движется на маяк, пока

расстояние до него не станет равным радиусу дуги окружности. Далее робот движется по дуге под управлением внутренних датчиков. После поворота на заданный угол робот фиксирует положение следующего маяка и процесс повторяется.

В данной работе использован разработанный ранее алгоритм управления двигателем модулем, который обеспечивает перемещение под заданным углом в целевую точку с заданными координатами на основе информации о текущем положении этой точки относительно робота (аналогично положению маяка) [1, 2]. Данный алгоритм был модифицирован таким образом, чтобы текущее положение целевой точки определялось на основе датчиков угла поворота колес. Это дает достаточно высокую точность вычисления при условии отсутствия проскальзывания колес, что может быть обеспечено в случае использования одного двигательного модуля и установки датчиков угла поворота на двух неприводных колесах. Математическая модель робота, разработанная с учетом указанных особенностей в приложении SIMULINK среды программирования MATLAB, приведена на рисунке 2.

Система управления содержит каналы регулирования скорости перемещения и угла поворота. Для каждого из каналов были опробованы различные типы регуляторов. Приемлемые результаты получены при использовании пропорционального регулятора в канале регулирования скорости и пропорционально-дифференциального регулятора в канале регулирования угла поворота. Хорошее качество регулирования также обеспечивается при синтезе приводов методом размещения полюсов.

Результаты моделирования показали, что робот способен в автономном режиме осуществлять перемещение в заданную точку с поворотом на заданный угол (в рассматриваемом случае на 90 градусов) по траектории близкой к дуге окружности. Форма траектории при заданном радиусе 2 м приведена на рисунке 3. Следует отметить, что в данном случае не является обязательным, чтобы движение на угловых участках траектории осуществлялось именно по окружности. Важно, что попадание в заданную точку производится с отклонением, не превышающим 5 см по координатам и 1-2 градусов по углу. Данное условие выполняется в широком диапазоне задаваемых радиусов и скоростей перемещения.

Рассматриваемый робот в соответствии с выполняемой операцией должен с одной стороны, обеспечивать максимальную производительность, с другой – двигаться с ограниченным ускорением во избежание опрокидывания грузов, уложенных друг на друга стопкой. Это может быть обеспечено за счет соответствующего управления скоростью.



Движение по окружности осуществляется с постоянной скоростью, рассчитываемой, исходя из величины радиуса и предельного значения нормального ускорения. На прямолинейных участках движение осуществляется с максимальной скоростью, а разгон и торможение производится при ограниченном ускорении.

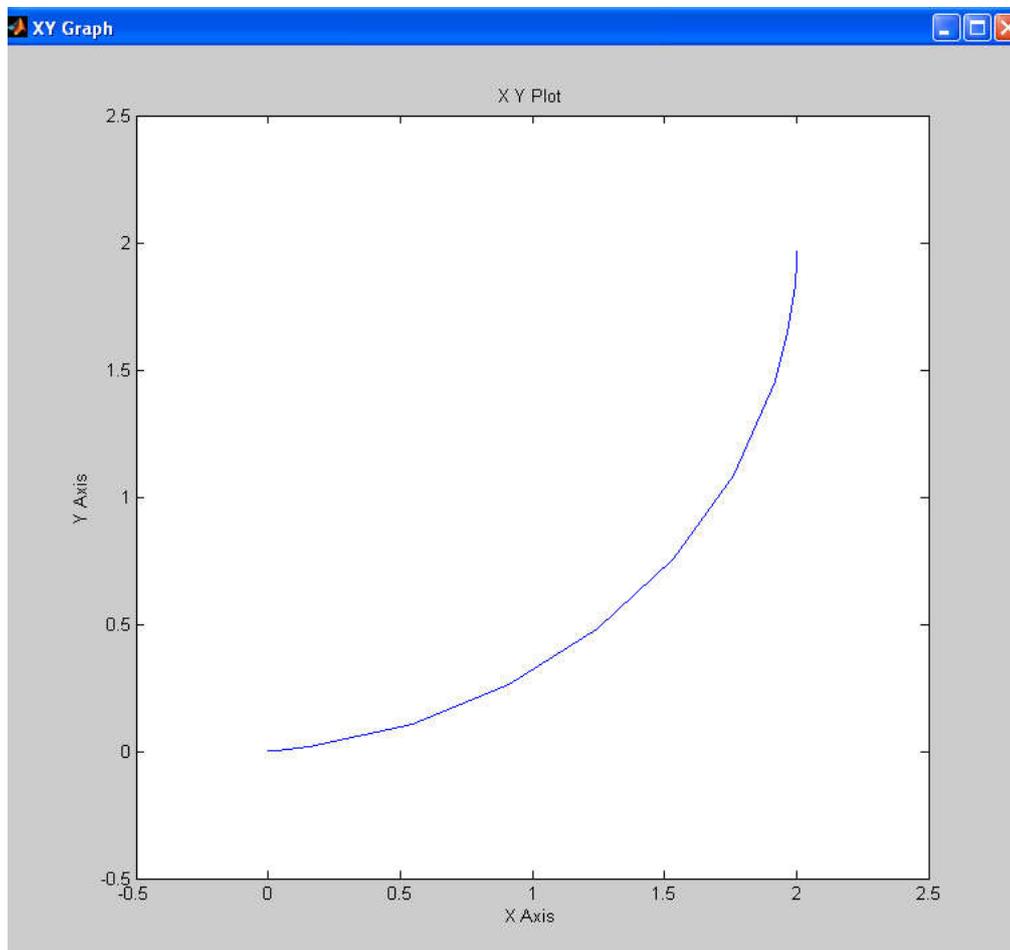


Рисунок 3 – Форма траектории по результатам моделирования

Таким образом, результаты математического моделирования подтверждают эффективность предложенной системы управления движением мобильного робота. Ее можно использовать для управления роботами при автоматизации складов.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Прокопеня О.Н., Козлович К.А., Халитов В.В. Система управления двигательным модулем мобильного робота // Материалы республиканского научно-практического семинара «Автоматизация и роботизация процессов и производств», Минск, 13 февраля 2014 г. / «Бизнесофсет» – Минск, 2014. – С. 65–67.

2. Штеттер Р., Прокопеня О.Н., Козлович К.А. THE PROBLEM OF MOBILE ROBOTS MOVEMENT CONTROL // Материалы международной научно-технической конференции «Новые технологии и материалы, автоматизация производства», Брест, 29 – 30 октября 2014 г. / БрГТУ – Брест, 2014. – С. 4–6.