

# АНАЛИЗ ГОЛОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО МЕКАНУМ-РОБОТА ПРИ УПРАВЛЕНИИ С НЕПРЕРЫВНО ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ КУРСОМ ТРАЕКТОРИИ

Радкевич А. А., Павлюковец С. А.

Кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок и технологических комплексов,  
Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

E-mail: {radkevichaa, sap}@bntu.by

*Рассмотрена проблема управления позиционным движением мобильного четырёхколёсного робота на меканум колёсах с непрерывно изменяющимся курсом траектории. Проанализированы параметры, характеризующие движение робота на плоскости и определяющие его голономность. Приведены рекомендации по повышению показателей качества путём модернизации системы управления.*

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема устойчивого движения мобильного робота на всенаправленных колёсах связана с решением сложных задач нелинейной динамики с учётом кинематики механизма. Для робота, имеющего четыре всенаправленных колеса типа меканум, важными показателями позиционного управления являются точность позиционирования, ошибка положения, угол отклонения корпуса, а при наличии требований к быстродействию – динамические характеристики двигателей (угловые скорости и динамические моменты).

### I. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТА

Для исследования и анализа свойств робота была создана имитационная модель в программном пакете MATLAB Simulink, включающая подсистемы, отражающие кинематическую и динамическую модели робота, модель движения по заданной траектории, инструменты вывода и визуализации данных. Математическая модель исследуемого робота описана авторами в статье [1]. Процесс создания компьютерной модели подробно рассмотрен в статье [2].

Рассмотрим динамическую модель робота, учитывающую передаточные функции четырёх вентильных синхронных электродвигателей, систем управления электроприводами, усилий и моментов, действующих на элементы робота в процессе движения, а также систему управления координатами центра масс робота по траектории.

Математическая модель синхронных электроприводов линеаризована для определения параметров объекта управления. В качестве электродвигателей выбраны синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) марки SGMSH фирмы Omron, мощностью 750 Вт, частотой вращения 3000 об/мин, крутящим моментом  $2,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Двигатели соединены с колёсами через планетарные редукторы.

Поскольку моделируемый робот относится к классу автономных устройств (АМУ), то система управления электроприводами замкнутая двух-

контурная. В астатическом контуре скорости применены ПИД-регуляторы. Контур тока содержит ПИ-регуляторы и предназначен для реализации векторного управления электродвигателями.

Задание траектории, представляющую произвольную кривую высокого порядка, осуществлено методом сплайновой интерполяции. В соответствии с координатами кривой получены выражения для координат центра робота и функции задания скорости для каждого колеса в зависимости от времени и в соответствии с принципами управления колёсами типа меканум. Также необходимо подчеркнуть, что движение робота моделировалось в плоскости X-Y, а влиянием сил реакции поверхности и трения на ролики колёс пренебрегается.

### II. АНАЛИЗ ГОЛОНОМНОСТИ ТРАЕКТОРНОГО ДВИЖЕНИЯ РОБОТА

Ключевым показателем качества траекторного управления для данного типа роботов является точность позиционирования. Результаты моделирования системы управления по произвольной сплайн-траектории показаны на рис. 1, где пунктиром обозначена заданная расчётная траектория, а сплошной линией – фактически пройденная траектория центра робота.

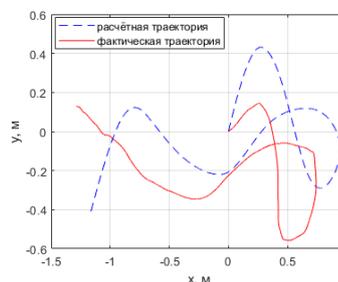


Рис. 1 – Расчётная и фактическая траектории робота

На рис. 1 присутствует значительное рассогласование траекторий. Влияние динамики электроприводов и иных сил, действующих на робот при движении сказывается на инерционности системы и, как следствие, отклонений от курса следования.

Поскольку система управления имеет контур регулирования скорости, проанализируем графики угловых скоростей колёс (рис. 2).

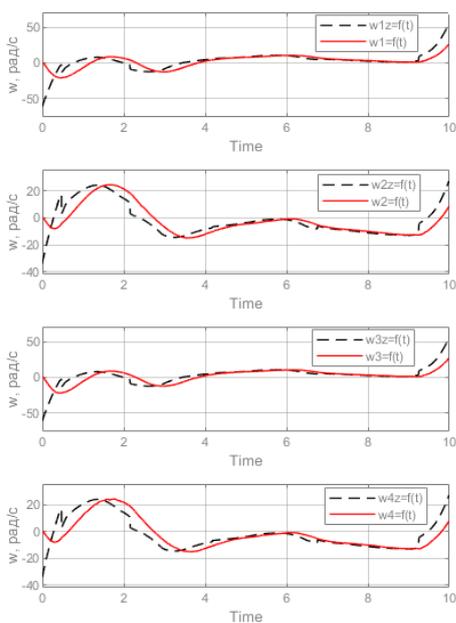


Рис. 2 – Графики угловых скоростей колёс робота

На рис. 2 пунктирной линией показаны задающие значения скорости, а сплошной линией – фактической скорости. Из графиков следует, что контур регулирования поддерживает устойчивость системы по скорости, а рассогласования незначительны. В целом, значения ошибок регулирования скорости являются допустимыми в условиях постоянного изменения параметров внешнего возмущения.

Характер ошибки позиционирования в координатах  $X$  и  $Y$ , показанный на рис. 3 трёхмерным графиком в функции времени, отмечает наибольшую величину ошибку положения в конечной точке траектории, с постоянным нарастанием величины ошибки до 1,5 м.

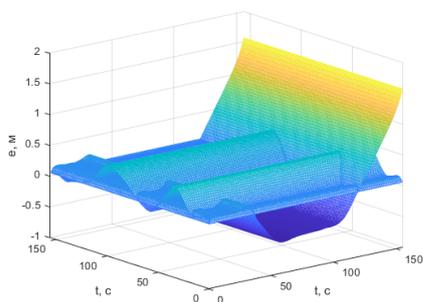


Рис. 3 – Графики ошибок позиционирования робота в осях  $X$  и  $Y$

Во время отработки траектории робот допустил отклонения по положению по сравнению с

исходным, максимальное значение которого составило 26 градусов (рис. 4).

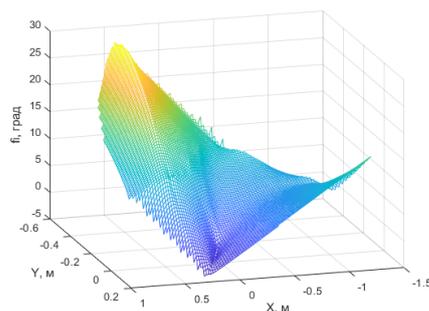


Рис. 4 – График угла отклонения в плоскости координат робота

Характер распределения угла отклонения в координатной плоскости демонстрирует наличие наибольших отклонений в областях вокруг точек с координатами  $(-0,6;0,1)$ ,  $(0,5;0,3)$ , которые соответствуют положениям робота в крайних точках кривой. На этих участках повышается интенсивность маневрирования и увеличивается ошибка положения вследствие более резкого изменения угла положения траектории. Из-за нелинейности СДПМ, инерционности механизмов робота снижается устойчивость системы и возрастает рассогласование в контурах управления электроприводами. ПИД-регуляторы скорости из-за своего быстрого действия не могут в полной мере обеспечить поддержание одинаковой скорости вращения всех четырёх колёс. К тому же при маневрировании скорости вращения диагонально размещённых механум-колёс принимают противоположные значения, что может приводить при определённых значениях ускорения к заносу корпуса и потере маневренности.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольшие отклонения угла поворота корпуса робота проявляются в моменты увеличения ускорения диагонально размещённых колёс, то есть с ростом угла поворота и радиуса кривизны кривой траектории. Для повышения качества динамических показателей необходимо применение астатического контура положения.

### IV. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радкевич, А. А. Математическая модель движения мобильного робота с колесами всенаправленного типа / А. А. Радкевич, У Синьсинь, А. А. Вельченко, С. А. Павлюковец // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22, № 1. – С. 82–90.
2. Радкевич, А. А. Исследование динамических характеристик голономного робота с колесами типа механум на основе 3D параметрической имитационной модели / А. А. Радкевич, С. А. Павлюковец // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 5. – С. 359–369.