

In order to mathematically link the above signals, may be used the model in the form amplitude gain ( $A^2$ ) [3]. This model use  $S_{yy}$  – the auto power spectral density of signals for changing the signals from time domain ( $t$ ) to frequency domain ( $\omega$ ) [3]

$$A_{ry}^2 = \frac{S_{rr}}{S_{yy}} \quad (1)$$

A given model can also be written in the parameterized form [3]

$$A^2 = \frac{M_0 + M_1 s + M_2 s^2 + \dots + M_n s^n}{L_0 + L_1 s + L_2 s^2 + \dots + L_n s^n} \quad (2)$$

The analysis of the model parameters changes ( $M_0$ - $M_n$  and  $L_0$ - $L_n$ ) should enable the detection of small leaks, their location, size estimation. Indirectly thanks to the analysis of the leakage location size it will be possible to infer whether it is the result of intentional leak (gas collection) or it is caused by pipelines damage.

The transition from signal diagnostics to parametric gives further significantly greater signal analysis capabilities.

#### References

1. Grądzki R., Golak K., Lindstedt P., Bartoszewicz B., Reasons for the experimental research of gas outflows based on the signals of weak interactions between the tested model of the gas pipeline, and tested equalizer, J. KONBiN, Nr 2 (2015), s. 39-48
3. Grądzki R., Golak K., Lindstedt P. Basics of the Corrective - Resonant Spectral Method of Gas Flow Identification from the Damaged Pipeline and its Experimental Verification, Journal of KONBiN, vol. 44 (2017), pp. 159-175.
2. Lindstedt P., Grądzki R., Model for blade diagnosis in a working rotor machine employing the method of virtual elimination of stochastic environment. Archive of Mechanical Engineering, Vol. 58, nr 3 (2011), pp. 305-318.

УДК 681.5

## МИНИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

*Прокопеня О.Н., Минько Н.А., Вабищевич Л.И., Клопоцкий А.А.*

Брестский государственный технический университет  
Брест, Республика Беларусь

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.

Известны алгоритмы [1,2], которые обеспечивают попадание робота в целевую точку под заданным углом с требуемой точностью, однако траектория движения при этом является достаточно выпуклой. Цель работы – создание алгоритма, обеспечивающего построение траектории минимальной протяженно-

сти по опорным точкам, что обеспечивает движение с максимальной средней скоростью при минимальных затратах энергии.

Кратчайшим расстоянием между точками является длина соединяющего их отрезка прямой. Однако при движении по данному отрезку прямой робот не попадет в конечную точку под требуемым углом. Для разворота на заданный угол робот некоторое время должен двигаться по окружности, на которой лежит целевая точка. При этом вектор конечной скорости должен лежать на касательной к окружности, как показано на рисунке 1. Для минимизации пройденного пути окружность должна иметь минимальный радиус, соответствующий максимальному углу поворота колес. Очевидно, на начальном этапе робот также должен двигаться по дуге окружности, пока его ось не совпадет с касательной к окружностям. Таким образом, минимальная по длине траектория включает в себя дугу  $AC$ , отрезок касательной  $CD$  и дугу  $DB$ .

Данная траектория не может быть реализована на практике с абсолютной точностью из-за инерционности привода поворота колес. Так участки  $AC$  и  $DB$  будут представлять собой кривые с изменяющимся радиусом кривизны, поэтому точки  $C$  и  $D$  не будут находиться на окружности минимального радиуса. Участок  $CD$  также может отличаться от прямой линии, как показано пунктиром на рисунке 1, что незначительно увеличивает длину траектории.

Для того чтобы уменьшить влияние инерционности электропривода на точность попадания в целевую точку, можно применить следующую стратегию управления. Разворот (по возможности быстрый) в сторону целевой точки до совпадения продольной оси робота с касательной к окружности с центром в точке  $F$ . Движение по касательной до точки касания с окружностью и быстрый разворот колес для движения по окружности к целевой точке  $B$ .

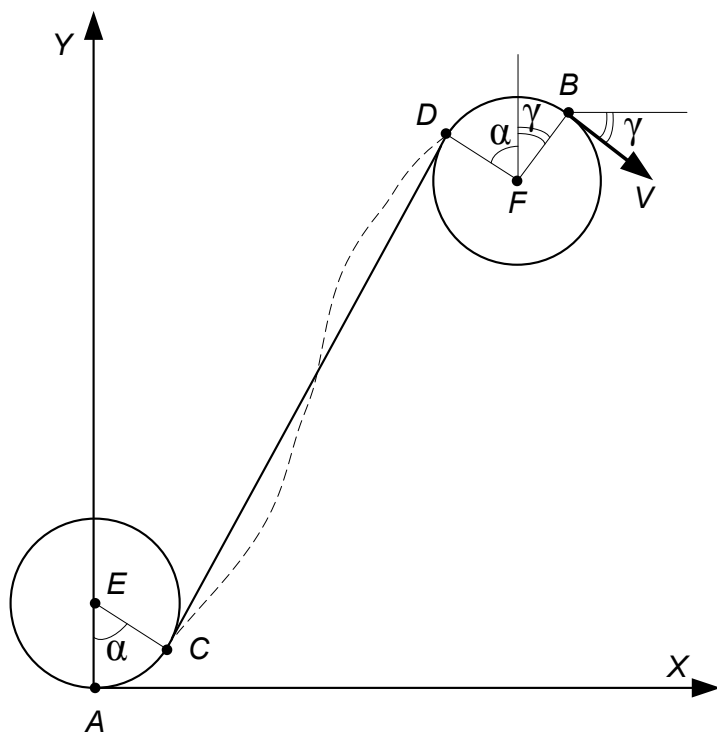


Рисунок 1 – Геометрия траектории минимальной длины

Угол между касательной к окружности и осью робота

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{y_F - \rho}{x_F} + \arcsin \frac{\rho}{l_{EF}}, \quad (1)$$

где  $y_F$  и  $x_F$  – координаты центра окружности,  $\rho$  – радиус окружности,  $l_{EF}$  – расстояние между центрами окружностей.

Координаты центра окружности

$$x_F = x_B + \rho \cdot \sin \gamma \quad (2)$$

$$y_F = y_B - \rho \cdot \cos \gamma$$

где  $x_B$  и  $y_B$  – координаты целевой точки,  $\gamma$  – угол поворота оси робота в целевой точке.

Расстояние до целевой точки

$$l_F = \sqrt{x_F^2 + y_F^2} \quad (3)$$

Соответственно

$$l_{EF} = \sqrt{x_F^2 + (y_F - \rho)^2} \quad (4)$$

Таким образом, поворот робота осуществляется до выполнения равенства (1). При этом управление движением робота может осуществляться либо в неподвижной системе координат, либо в системе координат, связанной с роботом. В последнем случае поворот осуществляется до выполнения условия  $\alpha=0$ . Это же условие выдерживается при движении по касательной к окружности, что гарантирует попадание в точку касания  $D$ .

Для того чтобы уменьшить влияние инерционности электропривода на точность попадания в целевую точку, можно применить следующую стратегию управления. Разворот (по возможности быстрый) в сторону целевой точки до совпадения продольной оси робота с касательной к окружности с центром в точке  $F$ . Движение по касательной до точки касания с окружностью и быстрый разворот колес для движения по окружности к целевой точке  $B$ .

Оценка влияния динамики привода была выполнена математическим моделированием в среде MATLAB. Результаты представлены на рисунках 2, 3.

Согласно рисунку 2, большая часть траектории представляет собой прямую линию. Длина начального криволинейного участка (до выхода на касательную) незначительна. Полностью отсутствуют колебания. Это обеспечивается во всем диапазоне скоростей перемещения до 1,5 м/с.

На рисунке 3 показана траектория движения по криволинейному участку (на завершающей стадии движения).

Как следует из рисунка 3, траектория движения весьма близка к дуге окружности и является гладкой. Движение также осуществляется без колебаний.

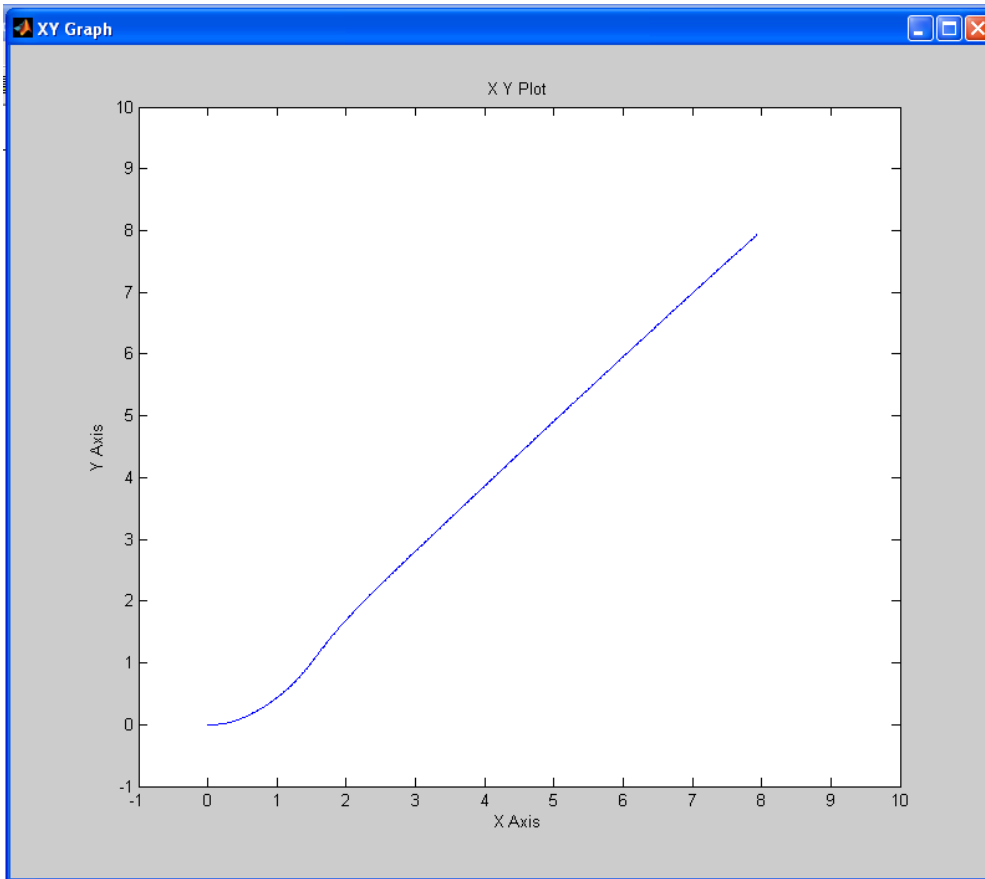


Рисунок 2 – Выход на касательную и движение по прямой линии

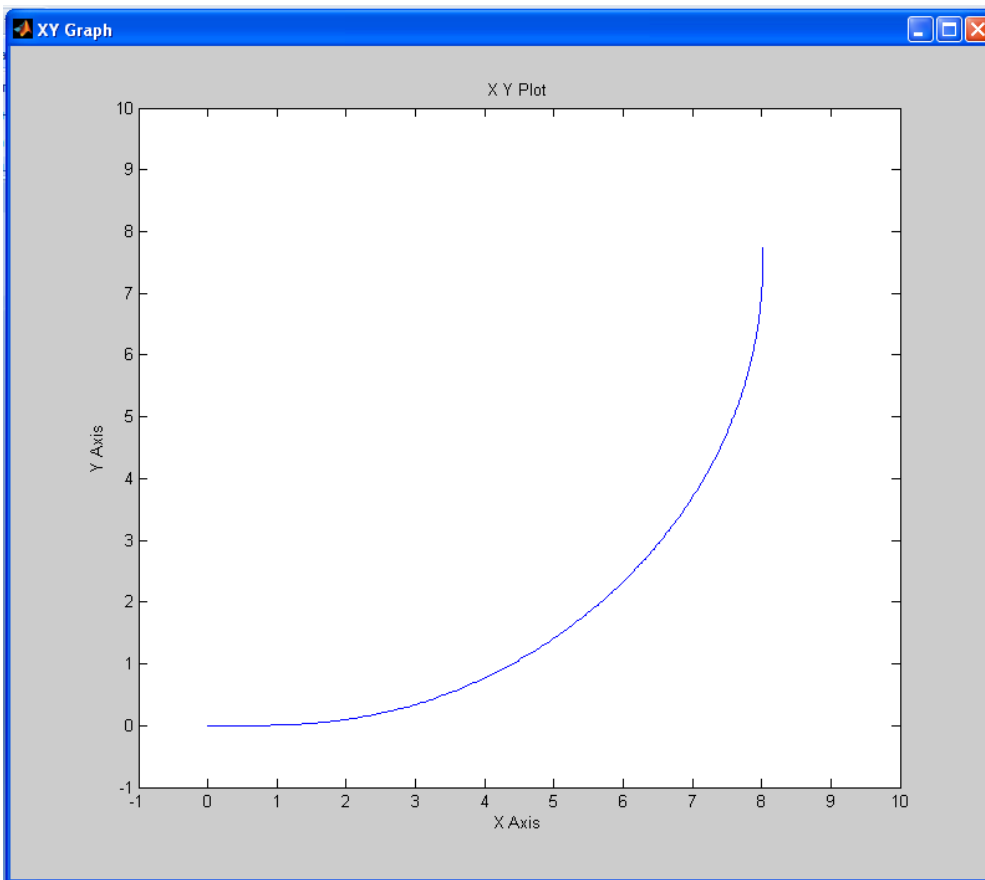


Рисунок 3 – Траектория движения по дуге окружности

Таким образом, результаты моделирования подтверждают возможность реализации предложенного алгоритма управления реальными приводами мобильного робота с использованием ПД-регуляторов. Данный алгоритм можно применить на практике.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. О.Н. Прокопеня, К.А. Козлович, В.В. Халитов. 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. Р. Штеттер, О.Н. Прокопеня, К.А. Козлович 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.

УДК 621.793

### **АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ НАГРЕВА В ПРОЦЕССЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ**

*Белоцерковский М.А.<sup>1</sup>, Белявин К.Е.<sup>2</sup>, Сосновский И.А.<sup>1</sup>,  
Курилёнок А.А.<sup>1</sup>*

- 1) Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь;
- 2) Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь.

Автоматизация процесса центробежной индукционной наплавки (ЦИН) антифрикционных либо износостойких порошковых слоев к внутренней поверхности цилиндрических заготовок [1-3] предусматривает использование автоматического регулирования и стабилизации режимов нагрева заготовок. Стабилизация режимов нагрева необходима в первую очередь для обеспечения стабильности повторяемости качества каждой из большого числа упрочняемых деталей. Использование автоматического регулирования процесса центробежной индукционной наплавки позволяет, с одной стороны, осуществлять стабилизацию строго заданных режимов нагрева, а с другой, - практически полностью исключить трудозатраты, связанные с необходимостью ручного регулирования этих режимов в течение каждого цикла нанесения покрытия.

Методы регулирования температуры наружной поверхности вращающейся заготовки при ЦИН могут быть разделены на две основные группы:

а) дискретное управление (включение-отключение источника нагрева в заданном интервале температур с помощью электрического реле).

б) непрерывное управление (регулирование мощности нагрева на основании электрического сигнала, регистрируемого пирометром).