

## ПРОВЕРКА КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА ТИПА ТРИПОД

© 2012 А. М. Грибков, Д. В. Шилин, И. П. Филин

Московский энергетический институт (национальный исследовательский университет)

Статья посвящена разработке кинематической модели трёхкоординатного пневматического манипулятора и её проверки на физическом стенде. В качестве датчиков обратной связи использовались оптические дальномеры. Сопоставлены результаты при физическом и математическом моделировании. Показана зона достижимости манипулятора. Закон управления пневматическими приводами был построен на базе нечёткой логики.

*Манипулятор, кинематическая модель, пневмопривод, дальномер, нечёткая логика.*

Пневматические приводы получили широкое применение при автоматизации производственных процессов. Пневмоустройства используются в качестве приводов зажимных и транспортирующих механизмов, в контрольно-измерительных приборах, при автоматизации машин и устройств, работающих в агрессивных средах, в условиях пожаро- и взрывоопасности, радиации, при значительных вибрациях и высоких температурах.

Однако пневматические приводы имеют и недостатки: при равных габаритах с гидравлическими развивают меньшие усилия, утечки воздуха понижают их КПД, заданные законы движения не могут быть выполнены ими с достаточной точностью.

Несмотря на эти недостатки, пневмоприводы с успехом применяют в тех слу-

чаях, когда наиболее существенное значение приобретают их преимущества.

Развитие автоматизации производственных процессов, прогресс в области науки и техники повлекли за собой существенное усложнение пневматических систем. Часто при обслуживании одной машины используются несколько пневматических приводов, которые могут составлять систему приводов, если связаны друг с другом функционально [1].

Как правило, эти системы обладают очень сложной кинематикой и решение задач управления усложняется.

Данная работа посвящена экспериментальной проверке кинематической модели робота типа «Трипод», внешний вид которого представлен на рис. 1.

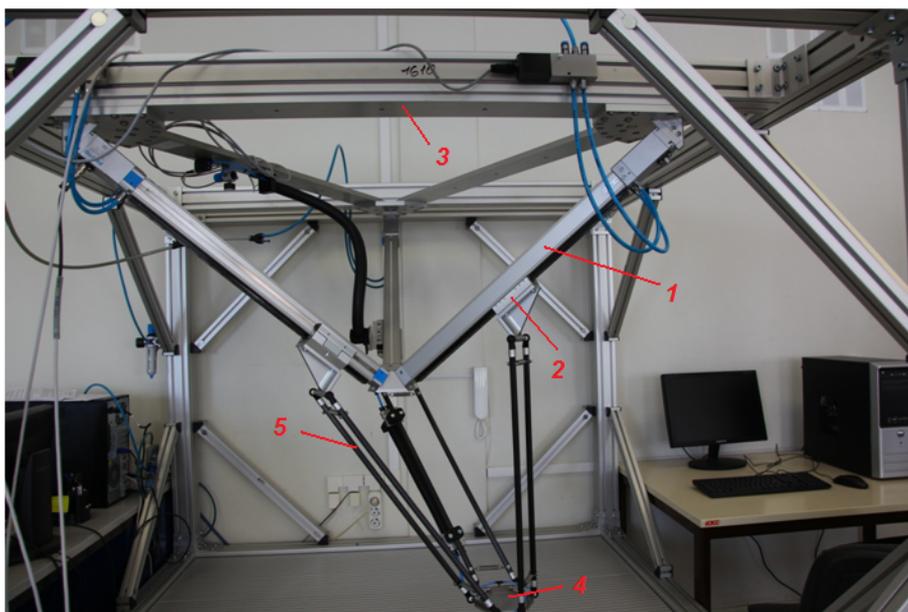


Рис. 1. Внешний вид стенда: 1 – пневматический привод, 2 – каретка, 3 – неподвижное основание, 4 – подвижная платформа, 5 – тяга

Тяги, соединяющие каретки с подвижной платформой, расположены парами и параллельны друг другу. За счёт такой конструкции плоскость подвижной платформы всегда параллельна плоскости неподвижного основания.

Расчётная кинематическая схема данного манипулятора представлена на рис. 2.

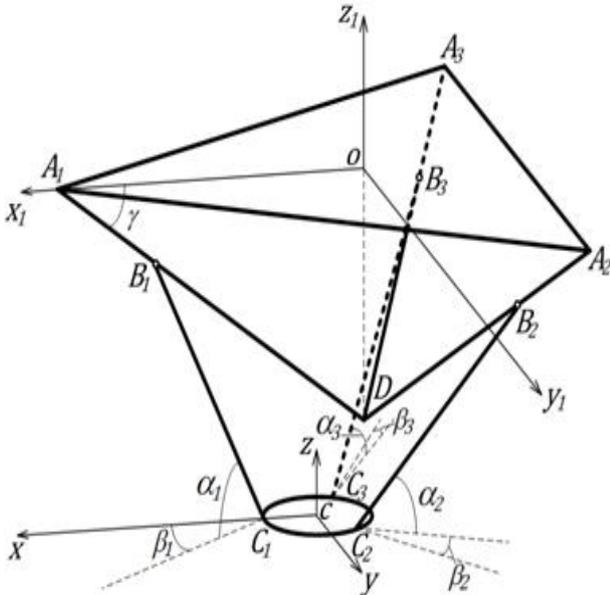


Рис.2. Расчётная кинематическая схема

Для прямой задачи кинематики была принята следующая система уравнений:

$$\sum_{j=1}^3 (x_{jC} - \overline{\Delta_{lj}})^2 - r_i^2 = 0, i = \overline{1, \dots, 3},$$

$$\overline{\Delta_{lj}} = x_{jC} - x_{jC_i} + x_{jB_i}, i, j = \overline{1, \dots, 3},$$

где  $x_{jC}$  –  $j$ -я координата центра подвижной платформы,  $r_i$  – длина  $i$ -й тяги,  $x_{jC_i}$  –  $j$ -я координата  $i$ -й вершины подвижной платформы,  $x_{jB_i}$  –  $j$ -я координата точки  $B_i$ , определяющей  $i$ -ю каретку.

Для обратной задачи были получены следующие формулы:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_i = \frac{(\sum_{j=1}^3 \overline{\Delta_{lj}} k_{ji})}{(\sum_{j=1}^3 k_{ji}^2)} \pm \\ \pm \frac{\sqrt{(\sum_{j=1}^3 \overline{\Delta_{lj}} k_{ji})^2 - (\sum_{j=1}^3 k_{ji}^2) (\sum_{j=1}^3 \overline{\Delta_{lj}}^2 - r_i^2)}}{(\sum_{j=1}^3 k_{ji}^2)}, \\ 0 \leq S_i \leq |A_i B_i|, \\ i = \overline{1, \dots, 3}, \end{array} \right.$$

$$\overline{\Delta_{lj}} = x_{jC} - x_{jC} + x_{jC_i} - b_{ji},$$

с учётом того, что:

$$x_{jB_i} = k_{ji} S_i + b_{ji}, \text{ где } i, j = \overline{1, \dots, 3},$$

где  $k_{ji}$  – коэффициент при  $S_i$  в выражении для  $j$ -й координаты точки  $B_i$ ,  $b_{ji}$  – свободный коэффициент в выражении для  $j$ -й координаты точки  $B_i$ .

Решение системы уравнений для прямой задачи кинематики проводилось в программе Visual C# методом Ньютона. Множеством решений данной системы уравнений является область достижимости манипулятора, представленная на рис. 3 [2].

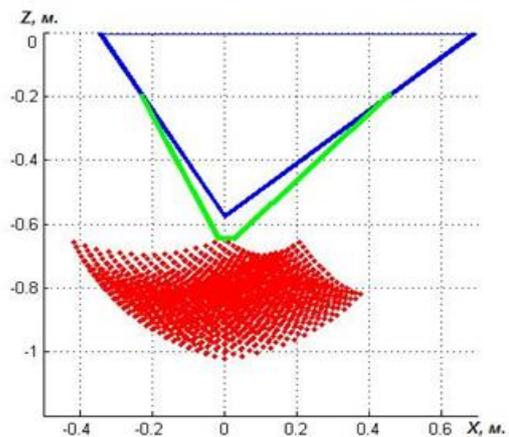
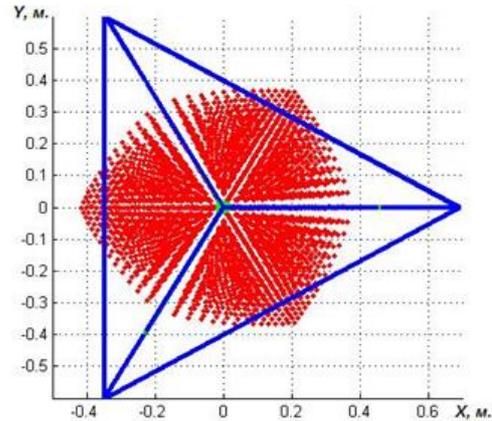
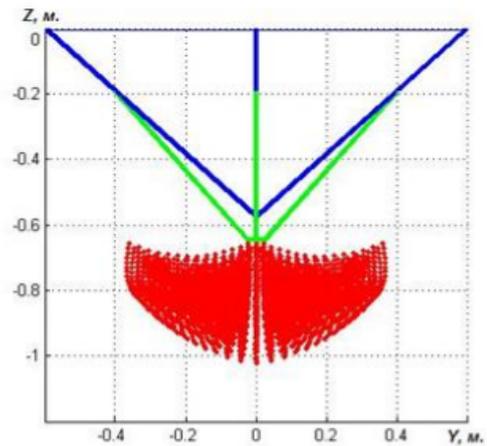


Рис. 3. Область достижимости манипулятора

На экспериментальном стенде были установлены три дальномера ODSL 96B, направленные по трём осям координат соответственно. Для отработки кинематической модели был разработан алгоритм управления пневмоприводами, построенный на базе нечёткой логики.

Основой нечёткой логики является база правил, которая формируется из нечётких высказываний «Если – То» и функций принадлежности для соответствующих лингвистических термов.

В рассматриваемом случае термами являются:

- 1) расстояние до точки позиционирования;
- 2) скорость движения каретки.

Исходя из проведённых ранее опытов с использованием П и ПД регуляторов, были получены знания о поведении системы в процессе позиционирования. На основе этих знаний были получены три нечётких переменных «Большое», «Среднее», «Маленькое».

Область рассуждений для расстояния будет в диапазоне 0-0,43 м и для скорости 0-5 м/с.

Далее строятся функции принадлежности для каждого лингвистического терма из базового терм-множества. Существует большое количество типовых форм кривых для задания функции принадлежности. Однако наиболее распространены треугольная, трапециевидальная и гауссова функции принадлежности.

На базе треугольной функции была построена функция принадлежности для расстояния и скорости (рис.4).

Функции принадлежности необходимы для приведения чёткой величины к нечёткости. На рис.5 приведена схема нечёткого логического вывода.

Функции принадлежности необходимы для фаззификации и дефаззификации значений. Процесс фаззификации рассмотрим на примере функции принадлежности по скорости (рис.4).

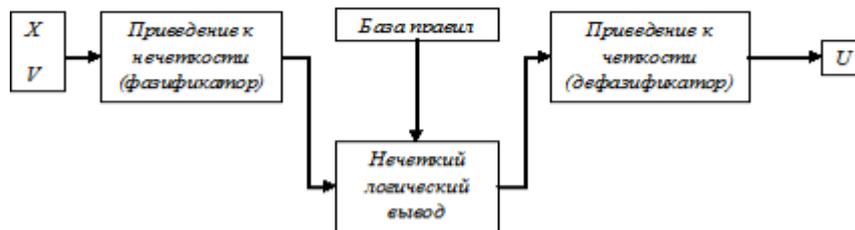


Рис.4. Функции принадлежности для расстояния и скорости

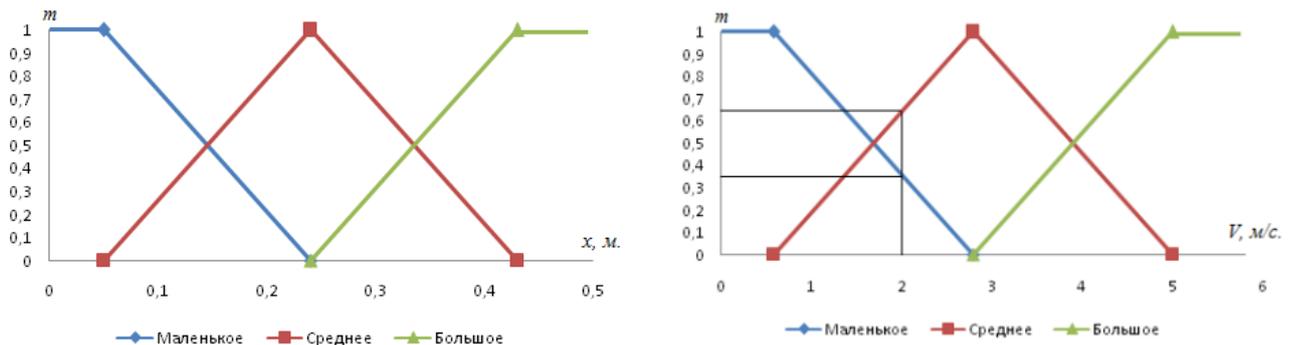


Рис.5. Схема нечеткого логического вывода

Допустим, входное значение скорости равно 2 м/с, тогда термы «маленькое» и «среднее» имеют значения 0,35 и 0,65 соответственно, остальные термы имеют степень принадлежности, равную 0. Таким образом, чёткое значение скорости 2 м/с имеют 2 нечётких значения 0,35 как маленькое и 0,65 как среднее. То же самое проделывается и для чёткого значения по расстоянию.

Следующим является этап нечёткого логического вывода: принятие решения исходя из степени принадлежности входных значений и базы данных. База данных – это совокупность правил, построенных на основе знаний об объекте управления и о процессе в целом. На рис.6 приведена база знаний для шести термов (3 по скорости и 3 по положению).

Расстояние	Скорость		
	Маленькое	Среднее	Большое
Маленькое	Keep	Smin	Vmin
Среднее	Smax	Keep	Smin
Большое	Vmax	Smax	Keep

Рис.6. База правил

В рассмотренном технологическом процессе позиционирования единственное возможное управляющее воздействие – сигнал управления распределителем. Как видно из базы знаний, выходное значение разделено на 5 термов:

- 1) *Keep* – ничего не предпринимать;
- 2) *Smin* – понизить;
- 3) *Vmin* – минимально понизить;
- 4) *Smax* – повысить;
- 5) *Vmax* – максимально повысить.

Исходя из этой базы знаний, нечёткий регулятор знает, что если на входе большая скорость и маленькое расстояние, то необходимо выполнить *Vmin* - минимально понизить скорость, а для этого закрыть распределитель.

Допустим, термы *M* и *C* расстояния равны 0,4 и 0,6, а термы *M* и *C* скорости равны 0,2 и 0,8. Тогда, исходя из базы знаний получаем:

- 1)  $\Delta x = M \text{ и } v = M, \text{ то } \omega = \text{keep};$
- 2)  $\Delta x = M \text{ и } v = C, \text{ то } \omega = Smin;$
- 3)  $\Delta x = C \text{ и } v = M, \text{ то } \omega = Smax;$
- 4)  $\Delta x = C \text{ и } v = C, \text{ то } \omega = \text{keep}.$

Каждое правило даёт степень принадлежности вывода по минимуму:

- 1)  $m_{\text{keep}}(\omega) = \min\{m_M(\Delta x); m_M(v)\} = \min\{0.4; 0.2\} = 0.2;$
- 2)  $m_{Smin}(\omega) = \min\{m_M(\Delta x); m_C(v)\} = \min\{0.4; 0.8\} = 0.4;$
- 3)  $m_{Smax}(\omega) = \min\{m_C(\Delta x); m_M(v)\} = \min\{0.6; 0.2\} = 0.2;$
- 4)  $m_{\text{keep}}(\omega) = \min\{m_C(\Delta x); m_C(v)\} = \min\{0.6; 0.8\} = 0.6.$

В случаях, когда в процессе формирования нечёткого вывода у одного терма имеются два разных значения степени принадлежности, из них берётся максимальное:

$$m_{\text{keep}}(\omega) = \max\{m_{\text{keep}}(\omega)1; m_{\text{keep}}(\omega)4\} = \max\{0.2; 0.6\} = 0.6.$$

Таким образом, термы выходных значений имеют степени принадлежности:

- 1)  $m_{Vmax} = 0;$
- 2)  $m_{Vmin} = 0;$
- 3)  $m_{Smax} = 0,2;$
- 4)  $m_{Smin} = 0,4;$
- 5)  $m_k = 0,6.$

Следующий этап – дефаззификация. Это процесс перехода от нечётких значений к чётким. Существуют различные способы дефаззификации: метод центра тяжести, метод медианы, метод центра максимумов. Воспользуемся самым распространенным методом – методом центра тяжести:

$$u_0 = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot \omega_i}{\sum_{i=1}^n m_i}.$$

Так получаем значение сигнала управления пропорциональным распределителем [3]. В результате экспериментов были получены характеристики степеней принадлежности, состоящие из 7 термов, соответственно база правил увеличилась до 49 правил. На рис. 7 представлен вид переходной характеристики выходного напряжения при позиционировании каретки пневмопривода.

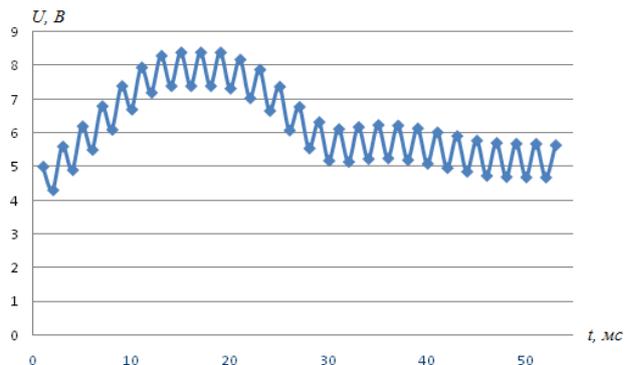


Рис. 7. Вид переходной характеристики выходного напряжения

Также были устранены шумы у потенциометров и зона нечувствительности у золотника пропорционального распределителя. Для устранения шумов потенциометра использовался осредняющий фильтр, который позволил уменьшить шум до 1,5 мм.

Для проверки кинематической модели на экспериментальном стенде были установлены три дальномера ODSL 96В, направленные по трём осям координат, соответственно. Для отработки кинематической модели поочередно выдвигалась каждая каретка пневмопривода при втянутом положении двух других. На рис. 8 сопоставлены результаты эксперимента с теоретическими резуль-

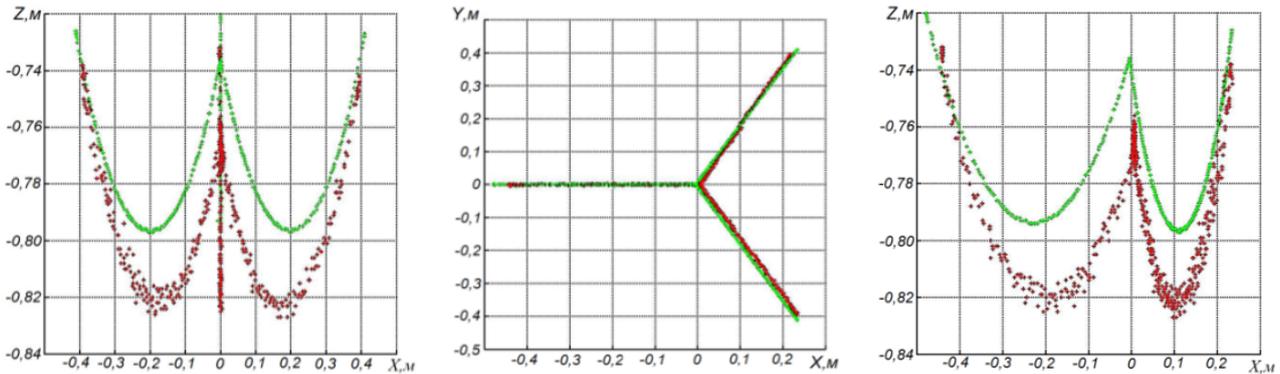


Рис. 8. Сопоставление траектории движения подвижной платформы с теоретическими результатами

татами. Для удобства анализа характеристик экспериментальные результаты на зависимостях  $Y(X)$  и  $Z(X)$  были опущены вниз на 20 мм. Как видно, максимальная разница между реальными значениями и вычисленными не превышает 10мм, а в среднем колеблется в районе 5 мм.

Такая ошибка может быть объяснена тремя факторами:

1. Возможно наличие ошибок при снятии физических размеров станда, что может вводить искажения на отдельных участках траекторий.
2. Погрешности, допущенные при монтаже, а именно при установке дальномеров и потенциометров.
3. Электрические шумы в потенциометрах и дальномерх, вносящие по-

грешности в измерения. Зачастую эти погрешности довольно значительны. Например, для потенциометров с фильтрацией сигнала они составляют 1,5 мм, а без фильтрации - 5 мм.

### Библиографический список

1. Егоров, О.Д. Конструирование мехатронных модулей [Текст]: учеб. / О.Д. Егоров, Ю.В. Подураев. - М.: ИЦ МГТУ "СТАНКИН", 2004. - 360 с.
2. Известия высших учебных заведений. Машиностроение [Текст]: журнал. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - №9. - 78 с.
3. Круглов, В.В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети [Текст]: учеб. / В.В. Круглов. - М.: Физматлит, 2001. - 221 с.

## TEST OF KINEMATIC MODEL BY PNEUMATIC MANIPULATOR

© 2012 A. M. Gribkov, D. V. Shilin, I. P. Filin

Moscow Power Engineering Institute (National Research University)

The article is devoted to the development of a three-axis kinematic model of a pneumatic manipulator and the testing of it on a physical model. Optical rangefinders are used as position encoders. The results of physical and mathematical modeling are compared. The reachable area of the manipulator is shown. The control laws of pneumatic actuators have been built on the basis of fuzzy logic.

*Manipulator, kinematic model, pneumatic drive, rangefinder, fuzzy logic.*

### Информация об авторах

**Грибков Александр Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой гидромеханики и гидравлических машин, Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт". E-mail: [GribkovAM@mpei.ru](mailto:GribkovAM@mpei.ru). Область научных интересов: гидромеханика, гидравлические машины.

**Шилин Денис Викторович**, аспирант кафедры гидромеханики и гидравлических машин, Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”. E-mail: [Deninfo@mail.ru](mailto:Deninfo@mail.ru). Область научных интересов: мехатронные системы, управление пневматическими приводами, нечеткая логика.

**Филин Иван Петрович**, ведущий инженер ЦП РГИ “МЭИ-FESTO”, Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”. E-mail: [citizen2c298@gmail.com](mailto:citizen2c298@gmail.com). Область научных интересов: мехатронные системы.

**Gribkov Alexander Michailovich**, candidate of technical sciences, associate professor, head of the hydro-mechanics and hydraulic machines, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”. E-mail: [GribkovAM@mpei.ru](mailto:GribkovAM@mpei.ru). Area of research: hydro-mechanics, hydraulic machines.

**Shilin Denis Viktorovich**, post-graduate student of the department of hydro-mechanics and hydraulic machines, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”. E-mail: [Deninfo@mail.ru](mailto:Deninfo@mail.ru). Area of research: mechatronic systems, control pneumatic actuators, fuzzy logic.

**Filin Ivan Petrovich**, chief engineer of TC RGI “MPEI-FESTO”, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”. E-mail: [citizen2c298@gmail.com](mailto:citizen2c298@gmail.com). Area of research: mechatronic systems.