

№26. – М.: Издательство «Московский государственный открытый университет В.С. Черномырдина», 2013. – 192 с.

2. Невлюдов И.Ш., Евсеев В.В., Бортникова В.О., Анализ современных средств автоматизированного проектирования микроэлектромеханических систем / И.Ш. Невлюдов, В.В. Евсеев, В.О. Бортникова// «Технология приборостроения» научно-техническом журнал «ГП НИТИП» №1, 2014. – X.: 2014. – 47 с.

3. Шурыгина В. Долгожданное МЭМС. Технология малых форм. // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 4/2002. – С.8–13.

4. Зинченко Л.А. Конспект лекций по блоку дисциплин «САПР НАНОСИСТЕМ». УМК «Автоматизированное проектирование МЭМС и НЭМС»: Библиотека Наноинженериш. – М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2008. – 30 с.: ил.

5. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник: Пер. с англ. / Пер. Заболотная Ю.А.; Ред. пер. Свинцов Е.Л. – М.: Техносфера, 2006. – 588 с.

6. Бортникова В.О. Основные особенности автоматизации проектирования устройств на основе МЭМС/ В.О. Бортникова//18-й Международный молодежный форум

«Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума.Т.1. – Харьков: ХНУРЭ.2014. – 216 с.

7. Распопов В.Я. Микроэлектронические приборы [Текст] / В.Я. Распопов. – М.: ИТ Пресс, 2007. – 400 с.

8. Невлюдов, И. Ш. Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии / Невлюдов И. Ш., Андрусевич А. А., Палагин В. А.; МОН Украины. – X.: Коллегиум - 2008. – 264 с.

9. Семенец В.В. Введения в мікросистемну техніку та нанотехнології [Текст]: учеб. / В.В. Семенец, І.Ш. Невлюдов, В. А. Палагин. – X.: Компанія СМІТ, 2011. – 416 с. – ISBN 978-966-2028-73-7

10. Теслюк В.М., Денисюк П.Ю. Автоматизация проектування мікроелектромеханічних систем на компонентному рівні [Текст] / В.М. Теслюк, П.Ю. Денисюк. 2011. – 192 с.

11. МикроЭлектроМеханические системы [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://www.nanometer.ru/2010/09/30/mems\\_218368.html](http://www.nanometer.ru/2010/09/30/mems_218368.html)

12. Новые датчики ускорения (акселерометры) компании STMicroelectronics [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://kit-e.ru/articles/elcomp/2005\\_6\\_44.php](http://kit-e.ru/articles/elcomp/2005_6_44.php)

УДК 629.735

## ФОРМИРОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ОСНОВНЫХ КОМАНД ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА

Д.т.н. И.Ш. Невлюдов, к.т.н. С.С. Милютин, А.А. Функендорф, Н.П. Демская, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В статье приведен аналитический обзор экспериментальных исследований по определению ограничений выполнения основных команд промышленного робота. Для этого использован промышленный шестизвенный антропоморфный робот РМ-01, имеющий следующие возможности поворотов звеньев: первое звено от  $-160^\circ$  до  $+160^\circ$ , второе – от  $-255^\circ$  до  $+45^\circ$ , третье – от  $-45^\circ$  до  $225^\circ$ , четвертое – от  $-110^\circ$  до  $+170^\circ$ , пятое – от  $-100^\circ$  до  $+100^\circ$ , шестое – от  $-266^\circ$  до  $+266^\circ$ . Установлено, что, несмотря на наличие «мёртвых» зон в работе каждого звена, их можно перекрыть возможностями поворота других звеньев. Предложено программное обеспечение, позволяющее рассчитывать возможные углы поворота звеньев из текущего положения.

У статті наведено аналітичний огляд експериментальних досліджень з визначення обмежень виконання основних команд промислового робота. Для цього використаний промисловий антропоморфний робот РМ-01 з шістьма ланками, який має такі можливості поворотів ланок: перша ланка від  $-160^\circ$  до  $+160^\circ$ , друга – від  $-255^\circ$  до  $+45^\circ$ , третя – від  $-45^\circ$  до  $225^\circ$ , четверта – від  $-110^\circ$  до  $+170^\circ$ , п'ята – від  $-100^\circ$  до  $+100^\circ$ , шоста – від  $-266^\circ$  до  $+266^\circ$ . Встановлено, що, незважаючи на наявність «мертвих» зон в роботі кожної ланки, їх можна перекрити можливостями повороту інших ланок. Запропоновано програмне забезпечення, що дозволяє розраховувати можливі кути повороту ланок з поточного становища.

The article provides an analytical review of experimental studies to determine the performance of the basic limitations of the industrial robot teams. To do this, use the industrial six-membered anthropomorphic robot RM-01, having the following features turns links: the first link from  $-160^\circ$  to  $+160^\circ$ , the second – from  $-255^\circ$  to  $+45^\circ$ , the third – from  $-45^\circ$  to  $225^\circ$ , the fourth – from  $-110^\circ$  to  $+170^\circ$ ,

the fifth – from  $-100^\circ$  to  $+100^\circ$ , the sixth – from  $-266^\circ$  to  $+266^\circ$ . Found that, despite the presence of "dead zones" in the work of each link, they can block pivotally other units. Proposed software that allows you to calculate possible angles links from the current position.

**Ключевые слова:** манипулятор, промышленный робот, ограничения, звено, степень свободы.

### Введение

Современный уровень развития производства предполагает повышение его гибкости. Для достижения этого используются различные методы, одним из которых является применение промышленных роботов, выбор которых определяется соответствием их технических характеристик требованиям и целям производства. Однако, в силу конструктивных особенностей перемещения и углы вращения звеньев манипуляторов имеют собственные ограничения.

Использование промышленных роботов в производстве требует разработки программ управления, которые обеспечат выполнение необходимых технологических переходов и операций.

При разработке и отладке программы управления роботом возможны ситуации, когда команды управления зададут такое перемещение, которое приведёт к попаданию манипулятора в «мёртвые зоны», обусловленные ограничениями, связанными с тем, что у каждого звена есть своя степень подвижности, угол его поворота или расстояние перемещения, что значительно затрудняет расчет движения манипулятора. Некорректный ввод таких параметров вызвать следующие ситуации: невыполнение команды или программы в целом, некорректное выполнение команды,

поломку манипулятора, что зависит от системы управления роботом.

Целесообразным представляется разработать такое программное обеспечение, которое будет рассчитывать возможные аргументы команд перемещения звеньев манипулятора из текущего положения и при введении некорректных значений выдавать сообщение об ошибке с указанием возможного диапазона значений.

Таким образом, тема, связанная с формированием ограничений на выполнение основных команд робота, является актуальной.

### Экспериментальная часть

В экспериментах использовался промышленный робот РМ-01 (в зарубежной литературе Puma).

Номинальная грузоподъемность – 4 кг. Число степеней подвижности – 6. Число рук/схватов – 1. Тип привода – пневматический. Устройство управления – позиционное. Способ программирования перемещений – обучение. Погрешность позиционирования – 0.1 мм.

Манипулятор выполняет основные технологические и частично транспортные операции. Его возможности расширены наличием комплекта инструментов, автоматически устанавливаемых на манипулятор [4,6].

Манипулятор является антропоморфным, то есть своим внешним видом напоминает человека, имеет шесть степеней подвижности. Шесть звеньев и основание манипулятора образуют шесть пар звеньев пятого класса. Вращение звеньев осуществляется вокруг осей, проходящих через центры суставов (рис.1)

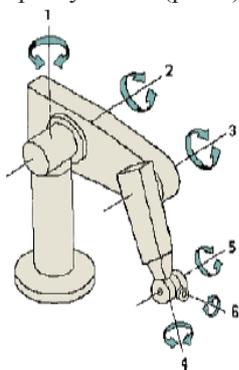


Рис. 1. Оси вращения шарниров промышленного робота РМ-01

Технические характеристики робота указывают, что рабочее пространство РМ-01 – сферическое с радиусом 0,92 м. В его пределах обеспечивается скорость перемещения схвата с максимальным грузом по свободной траектории до 1 м/с, а по прямолинейной траектории до 0,5 м/с.

Звенья манипулятора могут перемещаться в строго определенном диапазоне: первое звено от  $-160^\circ$  до  $+160^\circ$ , второе звено от  $-255^\circ$  до  $+45^\circ$ , третье звено  $-45^\circ$  до  $225^\circ$ , четвертое звено от  $-110^\circ$  до  $+170^\circ$ , пятое звено от  $-100^\circ$  до  $+100^\circ$ , шестое звено от  $-266^\circ$  до  $+266^\circ$ .

Эксперименты были направлены на исследование возможностей выполнения технологических операций и переходов роботом в пределах заявленного рабочего пространства.

Для непосредственного формирования ограничений на выполнение основных команд было разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать возможные углы поворотов звеньев из текущего их положения [1-5].

### Анализ полученных результатов

В технических характеристиках заявлено рабочее пространство промышленного робота РМ-01 сферической формы с радиусом 0,92м. Однако, исходя из вышеуказанных ограничений по перемещениям с одной стороны, первое звено образует «мёртвую зону» шириной  $40^\circ$ , с другой стороны, детальный анализ кинематики данного робота показывает, что возможности вращения второго звена полностью перекрывают ограничения, которые накладываются диапазоном допустимых значений угла поворота второго звена. Аналогичным образом снимаются ограничения, обусловленные «мёртвыми зонами» остальных звеньев.

Исходя из приведенных выше соотношений, а также ограничений по перемещениям звеньев манипулятора можно отметить, что при решении обратной задачи кинематики манипулятора указанные ограничения не сужают рабочее пространство робота. То есть, «мертвые зоны» каждого из звеньев манипулятора перекрываются степенями подвижности других звеньев.

Таким образом, особое значение ограничения по перемещениям приобретают именно при решении прямой задачи кинематики. Точнее, ограничения углов поворота звеньев имеют наибольшее значение при управлении роботом в режиме обучения. Так как при задании перемещений следует обязательно учитывать степени подвижности каждого сустава манипулятора. В противном случае программист может задать такие перемещения, которые промышленный робот не сможет выполнить. Тогда возможны следующие варианты:

- программа управления роботом не будет выполняться в целом, то есть после обнаружения ошибки управление не будет передаваться непосредственно роботу;
- часть программы управления роботом, а именно команда, содержащая некорректные аргументы, не будет передана к исполнению манипулятору;
- команда с некорректными аргументами будет выполняться некорректно, то есть звено будет поворачиваться в соответствии с конструктивными возможностями до упора, а затем управление передастся следующей команде;
- задание некорректной команды приведет к технической поломке манипулятора или к поломке системы управления.

Действие, которое будет выполняться при задании неправильного аргумента команды, зависит от системы управления роботом, от того как написаны обработчики ошибок, и написаны ли они вообще. Собственно от этого и будут зависеть экономические потери роботизированного производства [6-7].

Для разработки требуемого программного обеспечения было принято решение создать консольное приложение.

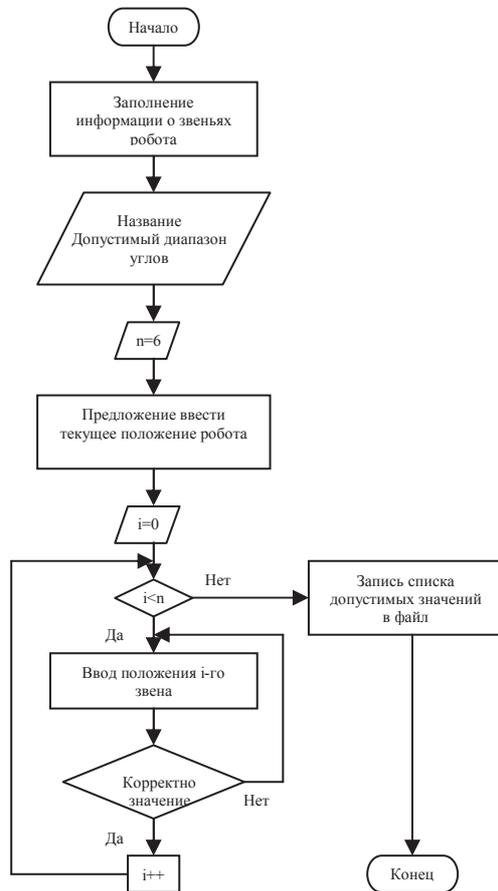


Рис. 2. Алгоритм работы программы

Для описания звеньев была создана структура, содержащая всю требуемую для расчётов информацию о звеньях, и сразу же создан массив структур, размерность которого соответствует количеству суставов рассматриваемого промышленного робота РМ-01 [8-11].

Ниже приведен текст созданной структуры.

struct links

```
{
    char name[10];
    int limmin;
    int limmax;
    int cur;
    int min;
    int max;
}zveno[6];
```

Переменная символьного типа name будет содержать название i-го сустава: base (колонна – первый сустав), shoulder (плечо – второй сустав), elbow (локоть – третий сустав), wrist (качание кисти четвёртый сустав), gripper (поворот кисти – пятый сустав), hand (схват – шестой сустав).

Целочисленные переменные limmin и limmax обозначают нижний и верхний пределы поворота сустава, которые задаётся техническими характеристиками.

В переменную cur будет записываться градусная мера угла поворота сустава, в котором он находится в данный момент.

Результаты расчётов допустимого интервала поворота сустава из текущего положения будут

записываться в переменные min (нижний предел) и max (верхний предел).

Далее создаётся массив структур, то есть массив звеньев (в данном случае – 6) – zveno[6].

Далее приведен текст главной функции программы.

```
void main()
{
    Link();
    cout<<"Input current robot position"<<"\n";
    for(int i=0;i<n;i++)
    {cout<<"Input "<<zveno[i].name<<" angle"<<"\n";
    cin>>zveno[i].cur;
    Check(i);}
    Write();
}
```

Прежде всего, необходимо заполнить названия суставов и интервалы возможных перемещений (углов поворота) звеньев манипулятора, определяемые конструктивными особенностями промышленного робота. Для этого создана функция Link(), текст которой приведен ниже.

```
void Link()
{
    strcpy(zveno[0].name,"base");
    zveno[0].limmin=-160;
    zveno[0].limmax=160;
    strcpy(zveno[1].name,"shoulder");
    zveno[1].limmin=-255;
    zveno[1].limmax=45;
    strcpy(zveno[2].name,"elbow");
    zveno[2].limmin=-45;
    zveno[2].limmax=255;
    strcpy(zveno[3].name,"wrist");
    zveno[3].limmin=-110;
    zveno[3].limmax=170;
    strcpy(zveno[4].name,"gripper");
    zveno[4].limmin=-100;
    zveno[4].limmax=100;
    strcpy(zveno[5].name,"hand");
    zveno[5].limmin=-266;
    zveno[5].limmax=266;
}
```

После этого программа предлагает пользователю ввести текущее положение промышленного робота. В цикле на экране появляются запросы на введение текущих положений суставов робота по очереди. После каждого введения градусной меры угла поворота, соответствующего конкретному звену, происходит проверка правильности, то есть допустимости, введённого значения. Если значение некорректно, то на экране отображается рекомендация, которая сообщает о допустимых углах. После корректного ввода необходимой информации программа производит расчёт возможного перемещения из текущего положения и выводит на экран о текущем допустимом интервале значений углов поворота звеньев манипулятора. Такой порядок действий происходит с каждым звеном по очереди.

Ниже приведен её текст функции расчёта возможного поворота сустава из текущего положения.

```
void Check(int a)
{
    if
((zveno[a].cur>=zveno[a].limmin)&&(zveno[a].cur<=zveno[
a].limmax))
    {zveno[a].min=zveno[a].limmin-zveno[a].cur;
    zveno[a].max=zveno[a].limmax-zveno[a].cur;
    cout<<"Now the "<< zveno[a].name<<" may be
rotated between "<<zveno[a].min<<"..."<<zveno[a].max<<"
degrees"<<"\n";
    }
    else {
    cout<<"The "<< zveno[a].name<<" may be rotated
between "<<zveno[a].limmin<<"..."<<zveno[a].limmax<<"
degrees"<<"\n";
    cout<<"Input right "<< zveno[a].name<<"
angle"<<"\n";
    cin>>zveno[a].cur;
    Check(a);
    }
}
```

Сначала производится проверка, попадает ли введённое значение угла поворота в диапазон, заданный техническими характеристиками промышленного робота РМ-01. После прохождения этой проверки рассчитывается, в каком диапазоне могут задаваться значения перемещений из текущего положения звена робота. О рассчитанном интервале выводится сообщение на экран. Затем следует предложение ввести угол текущего поворота следующего звена. Процесс повторяется для всех шести звеньев. В случае, когда пользователь вводит текущий угол поворота, который не принадлежит области допустимых значений, на экран выводится сообщение, которое содержит информацию об ограничениях данного конкретного звена. И пользователю предлагается ввести правильное значение. Далее рекурсивно вызывается функция расчёта интервала допустимых значений. То есть пока не будет правильно заполнено состояние проверяемого сустава робота, управление не передаётся на следующее звено.

Рассчитанные значения записываются в текстовый файл test, находящийся в папке с программой. Далее приведен текст функции, обеспечивающий это действие.

```
void Write()
{ ofstream out("test");
  for (int i=0;i<n;i++)
  {
    out<<zveno[i].name<<":
"<<zveno[i].min<<"\t"<<zveno[i].max<<"\n";
  }
  out.close();
}
```

Здесь сначала открывается файл, далее в цикле построчно записывается название звена (base, shoulder, elbow, wrist, gripper, hand) и ограничения углов поворота в каждом конкретном звене из данного положения [12-14].

## Выводы

В статье определены ограничения на выполнение основных команд перемещения манипулятора. Установлено, что, несмотря на наличие мёртвых зон в перемещениях каждого из звеньев промышленного робота РМ-01, их можно элиминировать благодаря возможностям перемещения остальных звеньев робота. Таким образом, выяснено, что в сферическом рабочем пространстве радиусом 0,92 м отсутствуют «мёртвые зоны», в которые не может попасть схват манипулятора.

Разработано программное обеспечение для расчета ограничений перемещения промышленного робота из текущего положения. Такое программное обеспечение позволит избежать ошибок, а также упростить сам процесс написания программного кода для управления РМ-01.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гонсалес, Р. Робототехника [Текст] / Р. Гонсалес – М. Мир, 1989. – 624 с.
2. Спыну, Г. А. Промышленные роботы [Текст] / Г. А. Спыну – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища шк., 1991. – 311 с.
3. Накано, Э. Введение в робототехнику [Текст] / Э. Накано – М.: Мир, 1988. – 334с.
4. Ямпольский, Л. С. Промышленная робототехника [Текст] / Под ред. Л.С. Ямпольского, В. А. Яхимович, Е. Г. Вайсман, Б. А. Дремчук, Л. В. Козаченко. – К.: Техніка, 1984. – 264 с.
5. Промышленная робототехника [Текст] / [под ред. Л.С. Ямпольского]. – К.: Техніка, 1984. – 282 с.
6. Невлюдов, И. Ш. Голосовое формирование управляющих команд при проектировании роботизированных сборочных процессов [Текст] / И. Ш. Невлюдов, А. М. Цымбал, С. С. Милютин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – Т. 4, № 2 (34). – С. 65–68.
7. Невлюдов, И. Ш. Интеллектуальное проектирование технологии роботизированной сборки [Текст] / И. Ш. Невлюдов, А. М. Цымбал, С. С. Милютин. – Харьков, 2010. – 207 с.
8. Гліненко, Л.К. Основи моделювання технічних систем [Текст]. – Навч. Посібник / Л.К. Гліненко – Львів: Видавництво «Бескид Біт», – 2003. – 176с.
9. Проценко, В.С. Техніка програмування мовою Сі [Текст] / В.С. Проценко – К.: Либідь, 1993. – 224 с.
10. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем: Учеб. пособие [Текст] / Воротников С.А. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 384 с.
11. Зенкевич С.Л. Управление роботами [Текст] / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 352 с.
12. Юревич Е.И. Основы робототехники [Текст] / Юревич Е.И. – [2-е изд., перераб. и доп.] – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
13. Майкл, Дж. Янг. Visual C++ 6 Полное руководство [Текст]. Пер. с англ. / Дж. Янг. Майкл – К.: Издательская группа ВНУ, 2000
14. MFC и Visual C++: энциклопедия программиста [Текст] / [Юджин Олафсен, Кенн Скрайбнер, К. Дэвид Уайт и др.]; пер. с англ.– СПб. ООО «ДиасофтЮП», 2004. – 992 с.