

ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ. Ч.1

Ульянов Сергей Викторович¹, Николаева Алёна Валериановна²,
Немчанинов Алексей Владимирович³

¹Доктор физико-математических наук, профессор;
ГБОУ ВО МО «Университет «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

²Аспирант;
ГБОУ ВО МО «Университет «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: nikolaevaav@lenta.ru.

³Студент;
ГБОУ ВО МО «Университет «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: Caros@mail.ru.

Статья открывает цикл работ по применению интеллектуальных вычислений в современных системах управления промышленными роботами. Вводная часть содержит статистику применения роботов в различных областях промышленности, показывающая, что роботизация промышленности с каждым годом увеличивается, а перед разработчиками систем управления стоит задача обеспечить максимальную производительность при внедрении в производственные линии промышленных роботов и целых комплексов. Обширное поле для решений дает развитие технологий интеллектуальных вычислений, отдельные элементы и комбинации которых активно внедряются в системы автоматического управления. Для демонстрации эффективности применения интеллектуальных вычислений при разработке систем управления промышленными роботами, был сконструирован макет робота-манипулятора, последовательность проектирования которого рассмотрена в данной статье.

Ключевые слова: интеллектуальные вычисления, промышленный робот, автоматизация.

COMPUTATIONAL INTELLIGENCE TOOLKIT FOR INDUSTRIAL ROBOTIC MANIPULATOR CONTROL. PT. 1

Ulyanov Sergey¹, Nikolaeva Alena², Nemchaninov Alexey³

¹Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;
Dubna State University,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

²Post graduate student;
Dubna State University,
Institute of the system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: nikolaevaav@lenta.ru.

³Student;

Dubna State University,

Institute of the system analysis and management;

141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;

e-mail: Caros@mail.ru.

The article opens a series of papers on the use of computational intelligence in modern industrial robot control systems. The introductory part contains statistics on the use of robots in various areas of the industry, which shows that the robotics industry is increasing every year. And the developers of systems management task is to squeeze the maximum performance in the implementation of production lines in industrial robots and entire complexes. Extensive field for the development of intelligent solutions gives calculations, the individual elements and combinations that are being actively implemented in automatic control systems. To demonstrate the effectiveness of computational intelligence in the development of industrial robot control systems, it has been designed robotic arm layout, design the sequence of which will be discussed in this article.

Keywords: intelligent computing, industrial robot, automation.

Введение

Автоматизация производства – средство повышения производительности труда и снижения себестоимости изготовленной продукции, улучшения ее качества, высвобождения большого количества рабочих, сокращения производственных площадей и улучшения условий труда [1, 2]:

1) повышается производительность за счет более быстрых манипуляций и возможности работать 24 часа в сутки; однако при неправильно выбранном применении, постоянных переналадках, большом количестве периферийного оборудования производительность может и снижаться;

2) улучшаются экономические показатели за счет снижения затрат на оплату специалистов;

3) повышается качество изделий путем устранения субъективных факторов; квалификация рабочих в условиях автоматизации не влияет на параметры изделия; в некоторых случаях требуемое качество может быть обеспечено только в условиях автоматизированного производства;

4) облегчаются условия труда и снижается производственный травматизм (при корректной эксплуатации оборудования); исключаются ручной тяжелый физический, опасный и монотонный труд;

5) освобождаются производственные площади за счет более концентрированного построения технологических процессов;

6) при использовании автоматического и полуавтоматического оборудования освобождается большое количество рабочих; автоматизация способствует повышению квалификации обслуживающего персонала.

Элементами автоматизации производственных процессов, широко применяемые в промышленности, являются промышленные роботы и робототехнические комплексы.

Согласно ГОСТ 25686-85 [3], промышленный робот (ПР) – автоматическая машина, стационарная или передвижная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций.

Целесообразно использовать ПР совместно с другими средствами автоматизации в составе гибких автоматизированных систем, например в составе робототехнических комплексов (РТК) [4, 5, 6].

В структуру РТК должны входить [7]:

1) оборудование, ПР для выполнения технологических операций;

2) транспортно-загрузочная система;

3) система контроля качества технологических операций.

Выбор конкретного автоматизированного решения зависит от вида производства, закладываемого бюджета на модернизацию, требований к качеству и безопасности. В [8] приведено сравнение двух решений для сборки и тестирования печатных плат: интеграция роботизированного манипулятора в имеющиеся тестеры, или установка на линию поверхностного монтажа полностью автоматического тестера.

По данным Международной Ассоциации Робототехники *IFR (International Federation of Robotics)* [9] за период с 1960 по 2013 годы в мире было продано около 2 650 000 единиц ПР. Некоторые из ранних роботов уже выведены из работы, как устаревшие физически или морально. По оценке IFR к концу 2013 года в мире функционирует от 1 332 000 до 1 600 000 робототехнических единиц.

На рис.1 приведена статистика за 2010-2013 годы по количеству проданных ПР в разных областях.

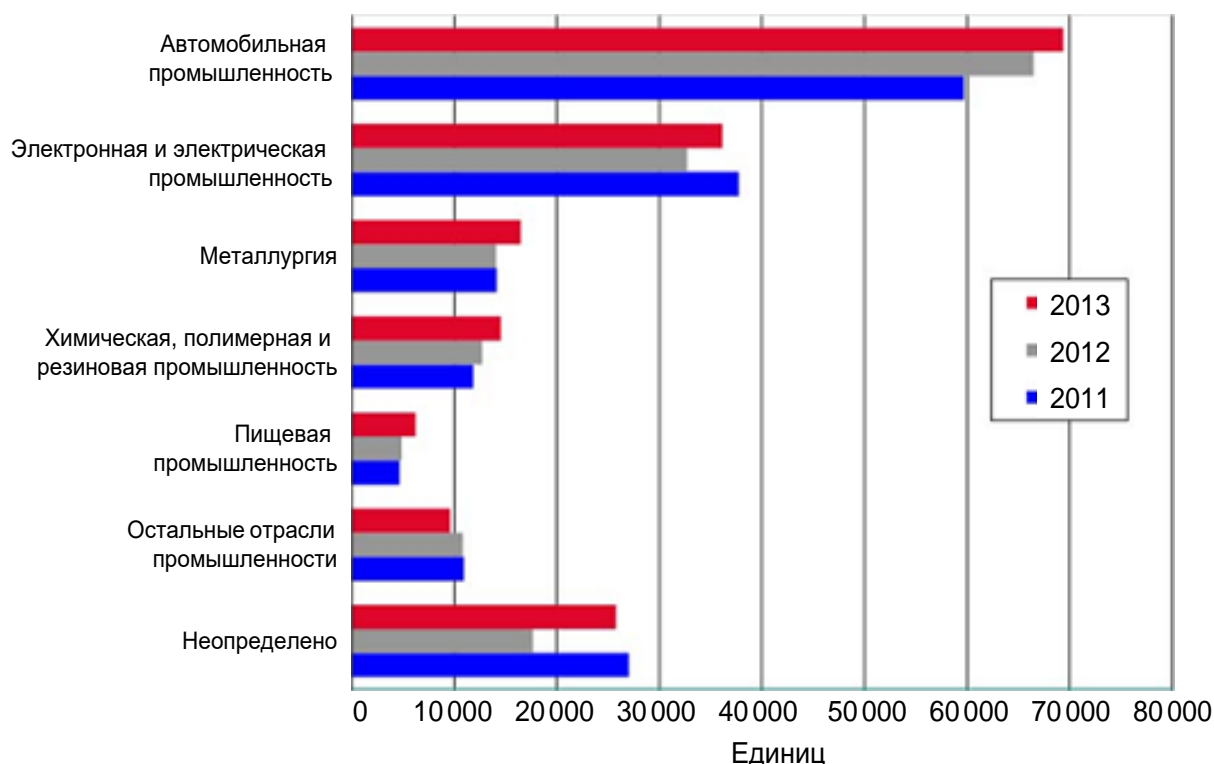


Рис. 1. Оценка мировых поставок ПР по отраслям за 2011 - 2013 годы

Начиная с поставок первых роботов *Unimate* на завод *General Motors* в 1961 году и по 2013 год автомобильная промышленность удерживает первое место в рейтинге потребителей промышленных роботов – за 2013 год на предприятия автоиндустрии было установлено 69 400 единиц ПР (39% от общего числа установленных за 2013 год роботов). В электронной промышленности (включая компьютеры и оборудование, радио и телевизионные устройства, устройства связи, медицинские, измерительные и оптические инструменты) число установленных ПР в 2013 году составило 36 200 единиц (20%), в металлургии и машиностроении – 16 500 единиц (9%), в химической, резиновой и полимерной промышленности – 12 200 единиц (7%), в пищевой промышленности и индустрии напитков – 6 200 единиц (4%).

В настоящее время большое количество компаний занимается производством ПР для сортировки, сварки, покраски, упаковки, шлифовки, полировки и т.д. с большим спектром возможностей как по точности, так и по характеру выполняемых операций. Производством и поставками ПР занимаются *FUNUC* (Япония), *KUKA* (Германия), *ABB* (Швеция, Швейцария), *KAWASAKI* (Япония), *MOTOMAN-YASKAWA* (США, Япония), *OTC DAIHEN* (Япония), *PANASONIC* (Япония).

На рис. 2 приведен пример ПР *Kuka* [10] – *KR 6 R700 SIXX* серии *KR AGILUS*.



Рис. 2. Общий вид и схема степеней свободы ПР Кука KR 6 R700 SIXX

Робототехническая система обычно состоит из следующих трех основных компонентов [11, 12]:

- 1) механическая часть (механические элементы, несущие конструкции, соединительные элементы);
- 2) аппаратная часть (микроэлектронные компоненты, силовая электроника, датчики, приводы, элементы питания);
- 3) программная часть.

Возможности робота зависят не только от выбранной компонентной и механической базы, но и от способностей системы целесообразно использовать эти возможности [13]. Поэтому программная часть является самой важной частью современных ПР. Чем сложнее структурные составляющие ПР, тем сложнее должна быть система управления. В основе системы управления ПР лежат принципы разомкнутого управления, компенсации ошибки управления и обратной связи.

Как и в автоматизированных системах управления (АСУ), в робототехнике широко используются три типа управления: пропорциональный (П), пропорционально-дифференциальный (ПД) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД). Однако современные системы управления роботами этим не ограничиваются. Для более полного использования ресурсов ПР, в системы управления внедряются элементы интеллектуальных вычислений: генетические алгоритмы [14], нечеткая логика [15, 16], нейронные и нечеткие нейронные сети [17, 18], методы роевого интеллекта [19], а также их комбинации [20, 21]

В данной работе будет описан макет робота-манипулятора, разработанный для демонстрации новых типов систем управления с применением интеллектуальных мягких и квантовых вычислений. Макет может быть применен для технологических операций сборки, переноса, покраски и др.

1. Построение системы управления манипулятором с семью степенями свободы с постоянными параметрами регулятора

Традиционная система управления представляет собой совокупность одного или нескольких ОУ и управляющей системы. В общем случае, система управления состоит из звена регулирования, ОУ, а также измерительной системы (ИС) в цепи обратной связи. Для обеспечения заданных динамических показателей в системах управления находят применение различные типы регуляторов. Наиболее широко распространены пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы. Интегральная составляющая регулятора позволяет устранить в системе статическую ошибку, а дифференциальная составляющая – улучшить динамические показатели, форсируя переходный процесс.

В общем случае необходимо найти коэффициенты ПИД-регулятора $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,7}$, при которых обеспечивается желаемый характер движения звеньев робота манипулятора.

Для определения коэффициентов $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,7}$ аналитическими методами, необходимы первоначальные знания о системе управления и характере поведения ОУ [22, 23], т.е. корректное определение коэффициентов ПИД-регулятора возможно с привлечением эксперта.

Включение в систему управления элементов интеллектуальных вычислений может позволить описать требования к системе управления в терминах качественных критериев.

Так, определение параметров управления возможно с использованием ГА, для чего необходимо лишь корректно определить функцию пригодности (*fitness*-функцию) ГА, например следующим образом: $fitness = (PTS = 1) \cap (I_T \rightarrow 0)$, где *PTS* (*Position Task Solution*) – решение задачи позиционирования манипулятором с тремя степенями свободы, а I_T – быстродействие системы управления.

Исходя из заданной функции пригодности, выбор коэффициентов $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,7}$ определяется исходя из обеспечения гарантированного решения задачи позиционирования с максимальным быстродействием.

Интеллектуальная надстройка в виде звена ГА без разрушения нижнего исполнительного уровня позволяет оперироваться качественными критериями системы.

Структурная схема системы управления на ГА приведена на рис. 3, где Q_{ref} – воздействующий (задающий) сигнал, Q' – измеренная регулируемая величина, $s(t)$ – ограничение управляющего воздействия, $K = [K_{Pi} \ K_{Di} \ K_{Ii}; \dots; K_{P7} \ K_{D7} \ K_{I7}]$ – матрица коэффициентов ПИД-регулятора, $d(t)$ – задержка в ИС, $m(t)$ – внешнее воздействие среды.

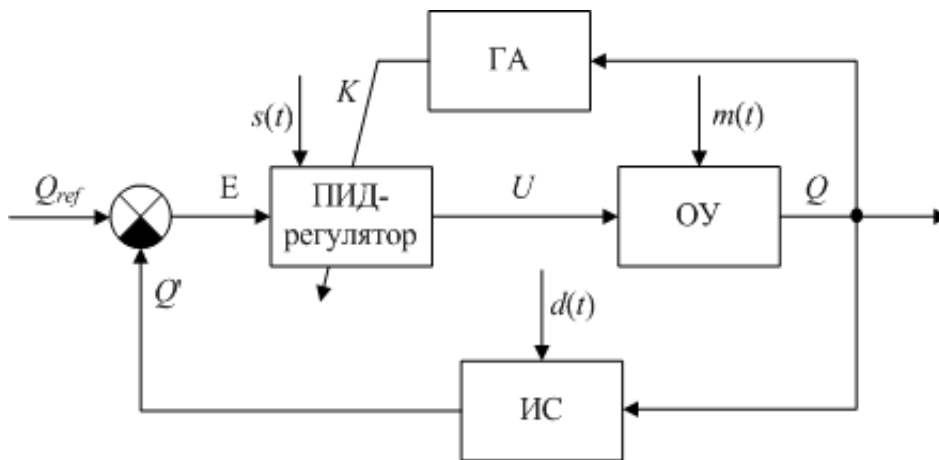


Рис. 3. Структурная схема системы управления на ГА

Выбор коэффициентов ПИД-регулятора в системе управления на основе ГА осуществляется один раз для одного или ряда случаев (штатные ситуации управления) и в процессе работы остаются неизменными. В результате, система управления на основе ГА справляется с задачей точного позиционирования манипулятора в штатных ситуациях. Однако система управления на основе ГА не обеспечивает гарантированного управления в непредвиденных ситуациях управления, что будет продемонстрировано ниже.

Применение системы управления на основе ГА ограничено требованием наличия описания постоянных условий внешней среды и известных структур управляющего звена и ОУ.

Расширение применимости системы управления возможно с помощью увеличения интеллектуальности системы управления — использования динамической настройки коэффициентов ПИД-регулятора, что возможно с включением элементов технологии мягких вычислений.

2. Проектирование интеллектуальной системы управления с применением технологий мягких вычислений

Основным элементов интеллектуальной системы управления (ИСУ) с применение технологий мягких вычислений [Ошибка! Закладка не определена.] является нечеткий регулятор (НР), управляющий коэффициентами усиления ПИД-регулятора. НР осуществляет управление за счет интегрированной в него базы знаний (БЗ), включающей данные о виде и параметрах функций принадлежности входных и выходных нечетких переменных, а также набор нечетких продукционных правил.

Создание БЗ производится с помощью интеллектуального инструментария Оптимизатор Баз Знаний (ОБЗ) на основе мягких вычислений.

Разработка БЗ рассмотрена ранее на примере робота манипулятора с тремя степенями свободы [24]. Было показано, что в зависимости от сложности системы и ОУ, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях может содержать один или несколько НР и с увеличением сложности ОУ, увеличивается время создания БЗ, повышаются требования к вычислительным ресурсам процессора, на котором создается БЗ и объему памяти системы, в которой размещается БЗ.

При возникновении ситуаций, когда сложность реализации единой БЗ высока, создаются несколько БЗ, которые размещаются в разных НР. Разделение управления несколько снижает качество системы, однако создание нескольких НР нередко является единственным способом организации интеллектуального управления сложным ОУ, таким как робот манипулятор с семью степенями свободы.

В связи со сложностью рассматриваемого объекта управления реализация единой БЗ невозможна, поэтому изначально организуем разделенное управление звеньями (один НР управляет одним звеном, как показано на рис. 4).

На рис. 4 используются следующие обозначения: $E = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \dots \ \varepsilon_7]$ – ошибка управления, $U = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_7]$ – управляющее воздействие, $TS_i, i = \overline{1,3}$ – обучающий сигнал соответствующего нечеткого регулятора (НР), $Q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_7]$ – регулируемая величина [25].

Для исследования качества рассмотренных систем управления, в среде *MatLab/Simulink* было моделирование систем управления манипулятором с семью степенями свободы.

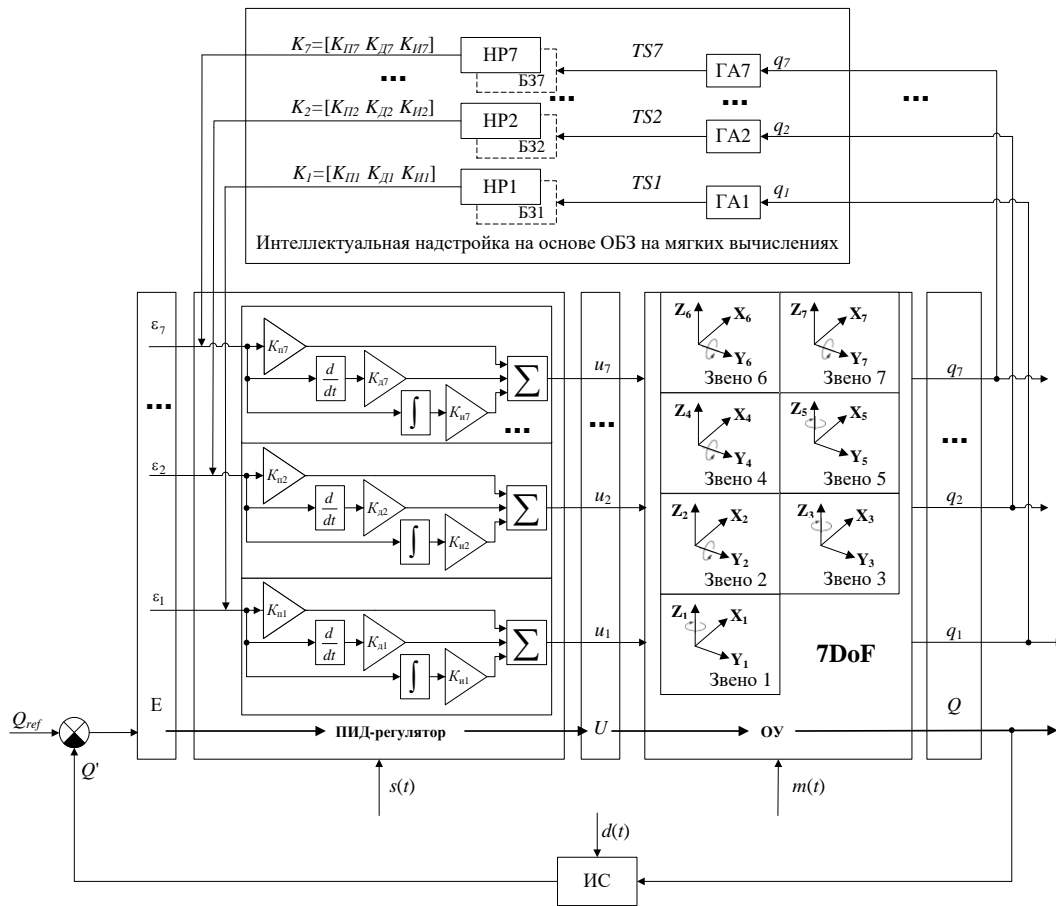


Рис. 4. ИСУ роботом манипулятором с семью степенями свободы на ОБЗ на мягких вычислениях

3. Порядок проведения и оценки экспериментов

В предположении, что звенья робота манипулятора могут вращаться в диапазоне (-70 +70) градусов и конфигурации степеней свободы соответствуют приведенной в таблице 1, построена формализованная модель манипулятора с семью степенями свободы.

Таблица 1. Конфигурация звеньев манипулятора

Звено	Ось вращения
Звено 1	Вертикальная (α_{z1})
Звено 2	Поперечная (α_{y2})
Звено 3	Вертикальная (α_{z3})
Звено 4	Поперечная (α_{y4})
Звено 5	Вертикальная (α_{z5})
Звено 6	Поперечная (α_{y6})
Звено 7	Поперечная (α_{y7})

Создание модели реального ОУ позволило ускорить идентификацию модели ОУ, получение приемлемых параметров управления для разных типов систем управления и с различным уровнем интеллектуальности.

Для демонстрации преимуществ и недостатков рассматриваемых типов систем управления в применении к манипулятору с семью степенями свободы в данной работе была проведена серия экспериментов для *MatLab/Simulink*-моделей. Серия экспериментов состоит из двух этапов: работа в штатных и работа в непредвиденных (нештатных) ситуациях управления.

В качестве штатных ситуаций управления выступают тринадцать экспериментов в соответствии с группой точек рабочего пространства, определенных как тестовых. За начальное положение манипулятора принимается конфигурация: ($q_1 = 0$ град; $q_2 = 0$ град; $q_3 = 0$ град; $q_4 = 0$ град; $q_5 = 0$ град; $q_6 = 0$ град; $q_7 = 0$ град).

Нештатные ситуации разделяются на внешние и внутренние.

Внешние непредвиденные ситуации:

1) принудительное изменение положений звеньев: первого звена до значения -30 градусов на 25-ой итерации и до значения 30 градусов на 75-ой итерации; второго—седьмого звеньев до значения -30 градусов на 50-ой итерации и до значения 30 градусов на 100-ой итерации;

2) изменены начальные условия – $q_1 = -30$ град; $q_2 = -30$ град; $q_3 = -30$ град; $q_4 = -30$ град; $q_5 = -30$ град; $q_6 = -30$ град; $q_7 = -30$ град;

3) осуществляется одновременно и принудительное изменение положений звеньев и изменение начальных условий.

Каждая из трех внешних непредвиденных ситуаций тестируется на тринадцати точках тестового пространства; таким образом, проводится 39 экспериментов для внешних непредвиденных ситуаций управления.

Внутренние непредвиденные ситуации:

1) уменьшение ограничений управляющих воздействий;

2) увеличение ограничений управляющих воздействий;

3) внесение шумов в каналы управления;

4) внесение погрешностей в систему измерения ($\pm 1,5$ град).

Каждая из четырех внутренних непредвиденных ситуаций тестируется на тринадцати точках тестового пространства; таким образом, проводится 52 эксперимента для внутренних непредвиденных ситуаций управления.

Для оценки и сравнения результатов испытаний рассмотренных типов систем управления – систем управления с постоянными коэффициентами и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях – введена система критериев качества, учитывающая методы оценки переходных процессов теории автоматического управления [23]. Данные методы были адаптированы для конкретного ОУ (робота манипулятора с семью степенями свободы) в следующем виде:

1. Решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления PTS_{KCS} (*Position Task Solution in known control situations*).

Задача позиционирования считается решенной, если по завершении заданного числа итераций $I_{max} = 300$ выполняется условие:

$$\begin{cases} PTS = 1, & \text{if } |q_{1ref} - q_1| + |q_{2ref} - q_2| + \dots + |q_{7ref} - q_7| \leq 2 \text{ deg} \\ PTS = 0, & \text{else} \end{cases}$$

где $q_{1ref}, q_{2ref}, \dots, q_{7ref}$ – желаемые положения звеньев, q_1, q_2, \dots, q_7 – текущие положения звеньев.

$$PTS \text{ выполнение} \equiv \frac{\sum_{i=1}^N PTS}{N}.$$

где N – число экспериментов.

2. Решение задачи позиционирования во внешних непредвиденных ситуациях управления PTS_{ACCS1} (*Position Task Solution in the above considered control situations*).

3. Решение задачи позиционирования во внутренних непредвиденных ситуациях управления PTS_{ACCS2} .

4. Быстродействие I_T .

Количество итераций от начала воздействия в течение которых осуществляется позиционирование каждого из звеньев с допустимой ошибкой $2\Delta < 1 \text{ deg}$:

$$I_T = I \left| \left(|q_{1ref} - q_1| < 1 \text{ deg} \right) \cap \left(|q_{2ref} - q_2| < 1 \text{ deg} \right) \cap \dots \cap \left(|q_{7ref} - q_7| < 1 \text{ deg} \right) \right|,$$

$$I_T \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N I_T}{NI_{\max}}.$$

4. Относительное значение перерегулирования σ

Отношение максимального отклонения текущего положения звена от установившегося значения к установившемуся значению:

$$\sigma = \max \left[\max \left| \frac{q_{1ref} - q_1}{q_{1ref}} \right|, \max \left| \frac{q_{2ref} - q_2}{q_{2ref}} \right|, \dots, \max \left| \frac{q_{7ref} - q_7}{q_{7ref}} \right| \right],$$

$$\sigma \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sigma}{N}.$$

5. Относительная ошибка позиционирования звеньев по завершении заданного числа итераций ε

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \left| \frac{q_{1ref} - q_1}{q_{1ref}} \right|, \text{ if } \left(|q_{1ref} - q_1| > |q_{2ref} - q_2| \right) \cap \left(|q_{1ref} - q_1| > |q_{3ref} - q_3| \right) \cap \dots \cap \left(|q_{1ref} - q_1| > |q_{7ref} - q_7| \right) \\ \varepsilon = \left| \frac{q_{2ref} - q_2}{q_{2ref}} \right|, \text{ if } \left(|q_{2ref} - q_2| > |q_{1ref} - q_1| \right) \cap \left(|q_{2ref} - q_2| > |q_{3ref} - q_3| \right) \cap \dots \cap \left(|q_{2ref} - q_2| > |q_{7ref} - q_7| \right), \\ \dots \\ \varepsilon = \left| \frac{q_{7ref} - q_7}{q_{7ref}} \right|, \text{ if } \left(|q_{7ref} - q_7| > |q_{1ref} - q_1| \right) \cap \left(|q_{7ref} - q_7| > |q_{2ref} - q_2| \right) \cap \dots \cap \left(|q_{7ref} - q_7| > |q_{6ref} - q_6| \right) \end{array} \right.,$$

$$\varepsilon \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon}{N}.$$

6. Время одной итерации t

Реальное время выполнения одной итерации I выбранного типа системы управления:

$$t \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{t}{t_{const}}, t < t_{const}.$$

7. Сложность реализации управления P .

Оценка изменения коэффициентов управления:

$$P \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \int_{i=1}^N \left(\frac{dK}{dt} \right)^2 dt}}{\max(K)}.$$

8. Общая оценка управления *FCB* (*Full Control Behavior*)

$$FCB \equiv w_1 \cdot P[PTS_{KCS}] + w_2 \cdot P[PTS_{ACCS1}] + w_3 \cdot P[PTS_{ACCS2}] + \\ + w_4 \cdot P[I_T] + w_5 \cdot P[\sigma] + w_6 \cdot P[\varepsilon] + w_7 \cdot P[t] + w_8 \cdot P,$$

где $w = [0.1 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.05 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.05]$ – весовые коэффициенты.

4. Качество систем управления с постоянными коэффициентами ПИД-регулятора

Как уже было сказано, задача управления сводится к нахождению коэффициентов ПИД-регулятора, при которых обеспечивается желаемый характер движения манипулятора.

Рассматриваются два типа систем автоматического управления (САУ) с постоянными коэффициентами: система управления на ПИД-регуляторе и с использованием ГА.

Сравнение работы систем управления манипулятором с семью степенями свободы на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА в соответствии с введенной системой критериев качества приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение работы систем управления с постоянными коэффициентами

Критерии качества	Качество управления	САУ на основе ПИД-регулятора	САУ с использованием ГА
1	Решение в штатных ситуациях управления	0,000	0,615
2	Решение в непредвиденных ситуациях: внешние возмущающие воздействия	0,000	0,256
3	Решение в непредвиденных ситуациях: изменения параметров ОУ	0,058	0,308
4	Быстродействие	0,000	0,008
5	Относительное значение перерегулирования	0,892	0,956
6	Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,379	0,657
7	Время одной итерации	0,998	0,998
8	Сложность реализации управления	1,000	1,000
9	Общее управление	0,244	0,439

Из результатов сравнения двух типов систем управления (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА) видно, что:

1) при использовании системы управления на ПИД-регуляторе задача позиционирования не решена ни в одном эксперименте в штатных ситуациях и внешних непредвиденных ситуациях управления, незначительные положительные результаты (3 эксперимента из 52) получены для внутренних непредвиденных ситуаций управления;

2) некоторое улучшение достигается при использовании системы управления на основе ГА: решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления достигается в большинстве экспериментов, однако в непредвиденных ситуациях управления (как внешних, так и внутренних) — решение достигнуто менее, чем в трети экспериментов;

3) и система управления на основе ПИД-регулятора, и с использованием ГА имеют низкое быстродействие;

4) при использовании системы управления на ГА значительно улучшаются показатели относительных значений перерегулирования и ошибок позиционирования по сравнению с системой управления на ПИД-регуляторе;

5) при использовании системы управления на ГА общая оценка управления по сравнению с системой управления на ПИД-регуляторе улучшается в 1,8 раз.

На рис. 5 продемонстрирована работа манипулятора при использовании систем управления на ПИД-регуляторе и с использованием ГА в условиях третьей внешней непредвиденной ситуации управления (изменено начальное положение и в разные моменты времени звенья принудительно перемещаются).

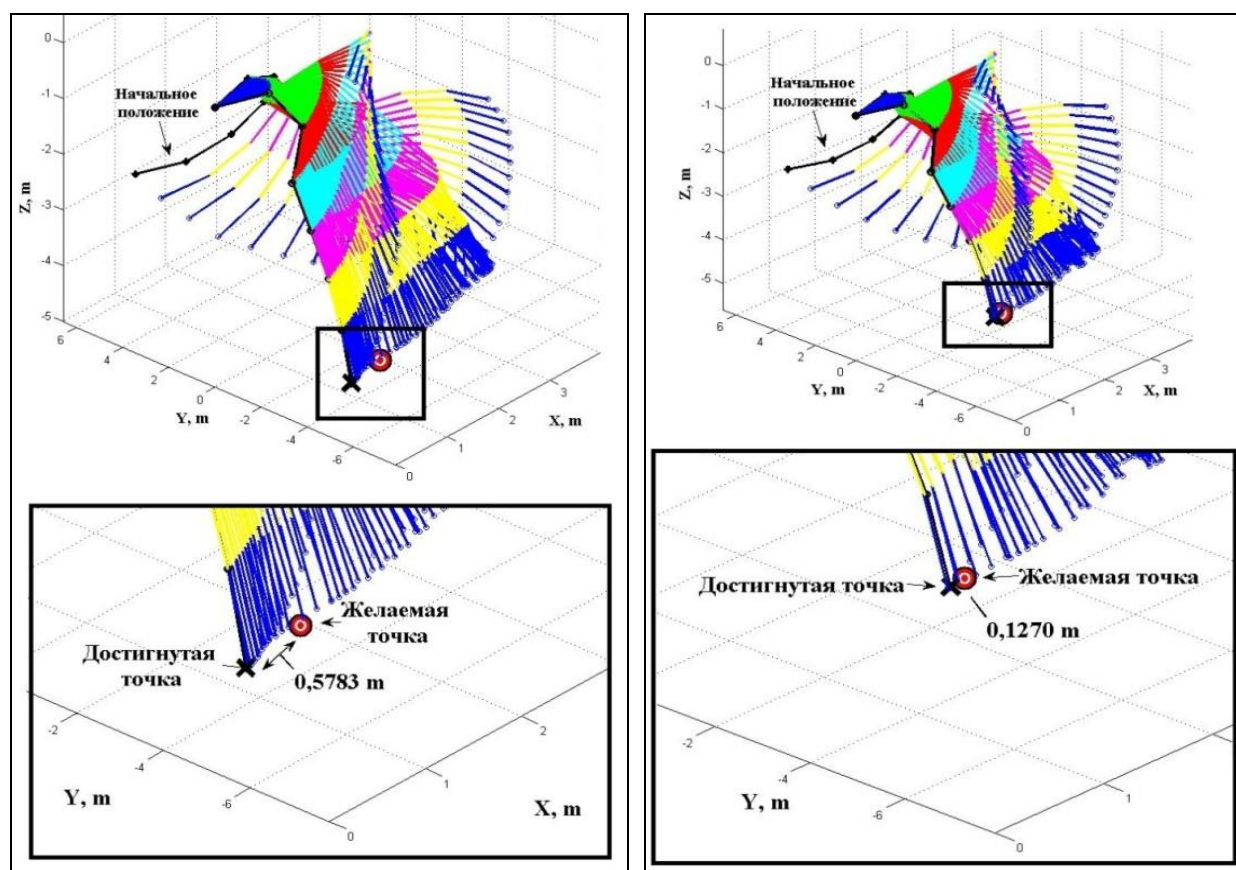


Рис. 5. Движение робота манипулятора в условиях внешней непредвиденной ситуации: под управлением ПИД-регулятора (слева); системы управления с использованием ГА (справа)

В выбранном для демонстрации эксперименте система управления на ГА решает задачу управления, в отличие от системы управления на ПИД-регуляторе.

Несмотря на то, что система управления на ГА значительно улучшает оценки критериев качества по сравнению с системой управления на ПИД-регуляторе, в целом обеспечиваемое системой управления на ГА качество управления довольно низкое.

В процессе управления коэффициенты ПИД-регулятора для рассмотренных структур не изменяются. Данное обстоятельство, с одной стороны, облегчает проектирование системы управления, а с другой, лишает систему управления возможности перестроения и адаптации.

Поэтому в качестве следующей ступени развития систем управления рассматриваем структуру с динамической адаптацией коэффициентов ПИД-регулятора, реализованной на основе технологий мягких вычислений.

5. Качество систем управления с применением технологий мягких вычислений

Тестирование полученных БЗ1–БЗ7 соответственно НР1–НР7 проводится в составе ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях.

Результаты испытаний ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в соответствии с введенной системой критериев качества в сравнении с системами управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА), приведены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение результатов работы систем управления с постоянными коэффициентами и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях

Качество управления	ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях	САУ с использованием ГА	САУ на основе ПИД-регулятора
Решение в штатных ситуациях управления	0,923	0,615	0,000
Решение в непредвиденных ситуациях: внешние возмущающие воздействия	0,744	0,256	0,000
Решение в непредвиденных ситуациях: изменения параметров ОУ	0,923	0,308	0,058
Быстродействие	0,092	0,008	0,000
Относительное значение перерегулирования	0,969	0,956	0,892
Относительная ошибка позиционирования звеньев	0,911	0,657	0,379
Время одной итерации	0,973	0,998	0,998
Сложность реализации управления	0,946	1,000	1,000
Общее управление	0,728	0,439	0,244

Из результатов сравнения систем управления (ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях, системы управления на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА) видно, что при использовании ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях:

- повысился процент решения задачи позиционирования в штатных ситуациях (решение положительное в 12 из 13 экспериментах) по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА);
- значительно повысился процент решения задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами: для внешних непредвиденных ситуаций в 2,9 раз и в 3 раза для внутренних непредвиденных ситуаций (в сравнении с системой управления на основе ГА);
- значительно увеличилось быстродействие: более чем в 10 раз по сравнению с системой управления на основе ГА; однако по-прежнему, быстродействие достаточно низкое;

- улучшились показатели относительного значения перерегулирования и относительной ошибки позиционирования звеньев по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами, но несколько ухудшились оценки времени одной итерации и сложности реализации управления;
- общая оценка управления улучшена в 1,7 раз по сравнению с системой управления с использованием ГА и в 3 раза по сравнению с системой управления на основе ПИД-регулятора.

На рис. 6 продемонстрирована работа манипулятора при использовании системы управления на основе ГА и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях в условиях четвертой внутренней непредвиденной ситуации управления (внесение погрешностей в систему измерения).

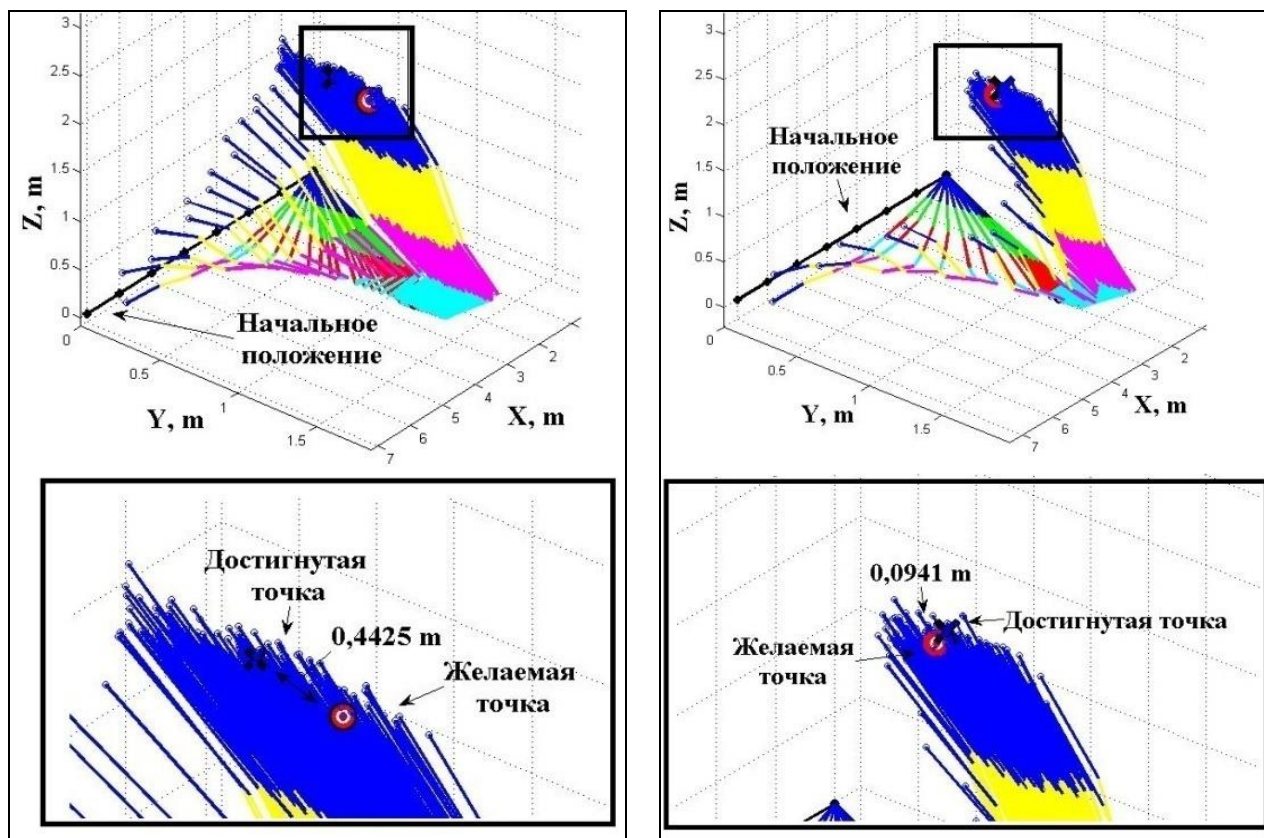


Рис. 6. Движение робота манипулятора в условиях внутренней непредвиденной ситуации: результат работы системы управления на основе ГА (слева); ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях (справа)

ИСУ роботом манипулятором с семью степенями свободы на ОБЗ на мягких вычислениях значительно улучшает качество управления по сравнению с системами управления с постоянными коэффициентами (на основе ПИД-регулятора и с использованием ГА), однако показатель быстродействия остается на достаточно низком уровне.

Ввиду того, что ОУ сложен, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях была организована с разделением управления: каждому звену манипулятора соответствует один независимый НР. Однако декомпозиция управления ведет к рассогласованию работы и некоторому снижению качества управления.

Организовать координационное управление без значительного увеличения сложности системы возможно путем введения дополнительных обобщающих звеньев, реализация которых возможна с использованием технологий квантовых вычислений.

6. Проектирование манипулятора с четырьмя степенями свободы

Общий вид манипулятора приведен на рис. 7

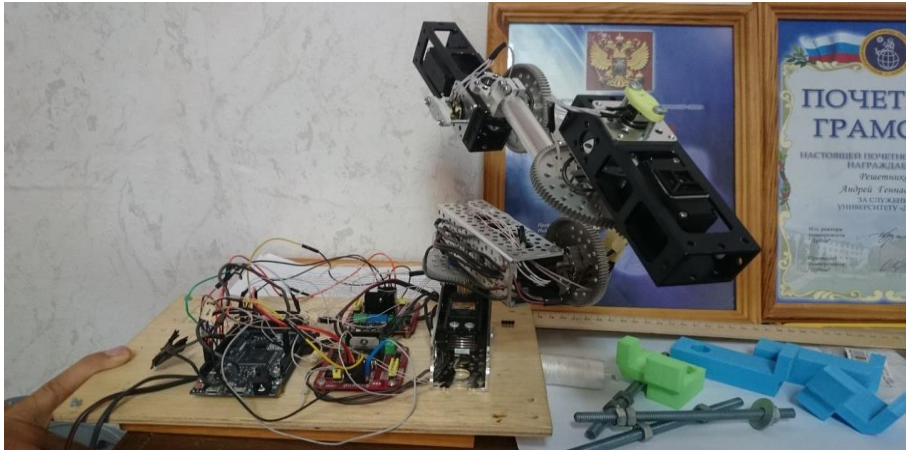


Рис. 7. Общий вид манипулятора

Схема степеней свободы манипулятора (рис. 8) следующая:

- 1) вращение вокруг оси Y ;
- 2-4) вращение вокруг оси Z .

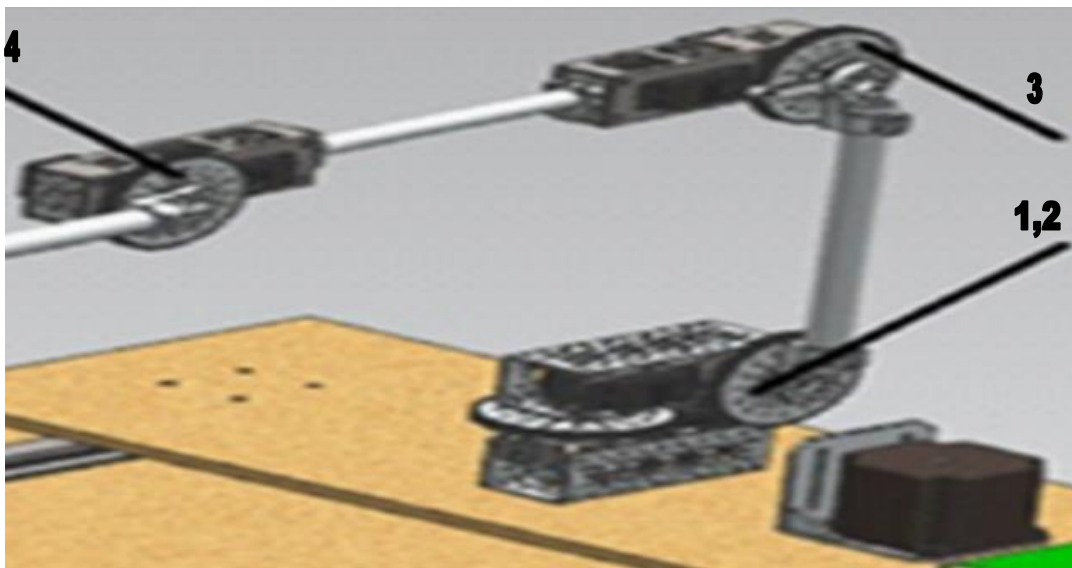


Рис. 8. Схема манипулятора

Для каждого звена используется типовая конструкция. Кинематическая схема типового звена изображена на рисунке 9.

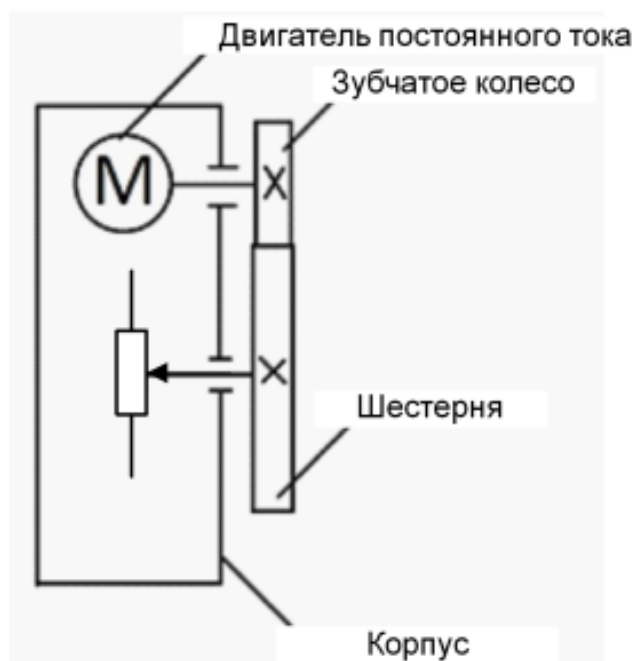


Рис. 9. Кинематическая схема типового звена

Основным элементом звена любого манипулятора является двигатель или привод. Существует несколько основных типов двигателей, которые могли бы использоваться для приведения в движение звеньев манипулятора в нашем случае мы использовали электрические моторы а контролировали их поведение при помощи драйверов схема их подключения представлена на рис. 10:

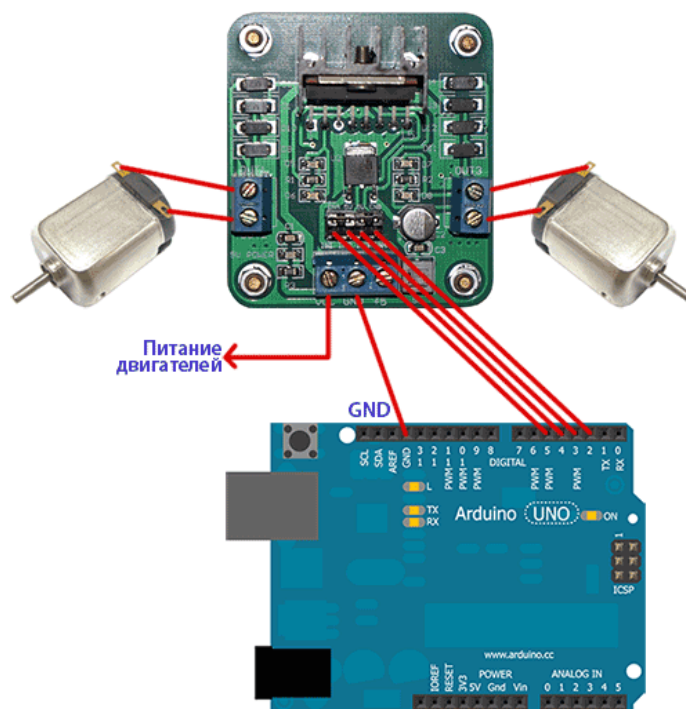


Рис. 10. Схема подключения

Общий вид типового звена манипулятора приведен на рис. 11.

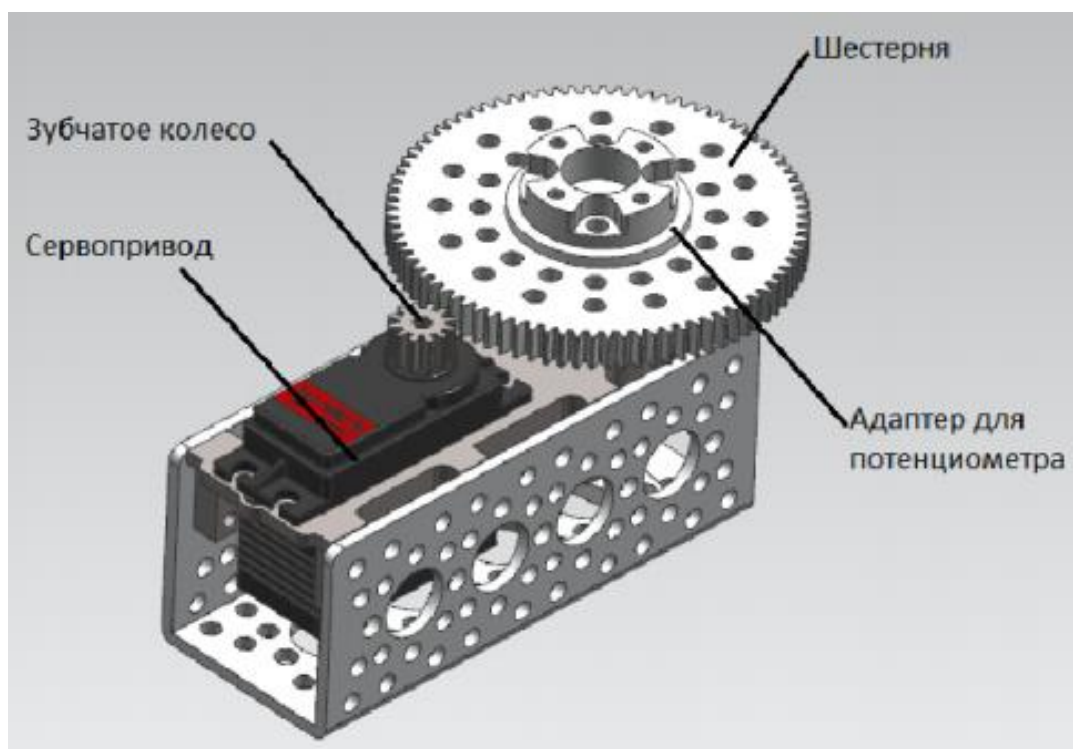


Рис. 11. Типовое звено

Первое звено манипулятора (рис. 12) содержит две степени свободы.

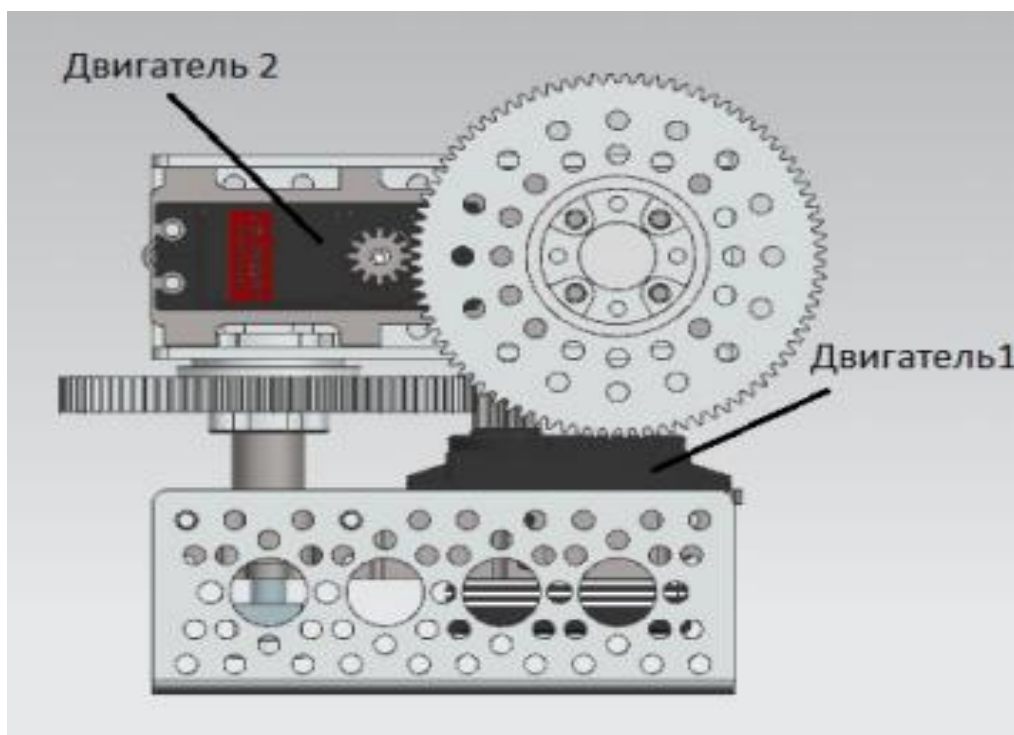


Рис. 12. Схема первого звена манипулятора

Двигатель 1 осуществляет поворот последующих звеньев манипулятора, а двигатель 2 – наклон. Последующими звеньями манипулятора являются типовые звенья (рис. 11)

7. Проектирование манипулятора с семью степенями свободы

Общий вид манипулятора приведен на рис. 13

Схема степеней свободы манипулятора (рис. 13) следующая:

- 1) линейный блок, движение вдоль оси X ;
- 2) вращение вокруг оси Y ;
- 3-7) вращение вокруг оси Z .

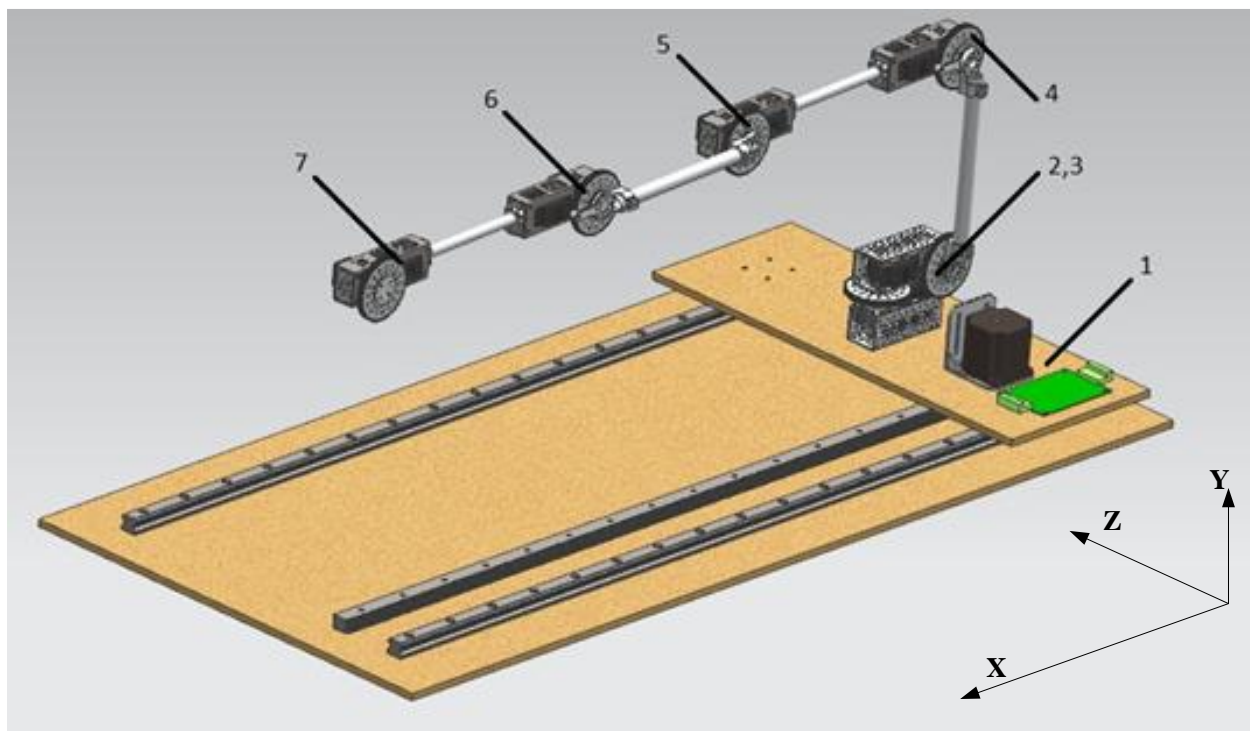


Рис. 13. Вид манипулятора

Для каждого звена используется типовая конструкция. Кинематическая схема типового звена изображена на рис. 14.

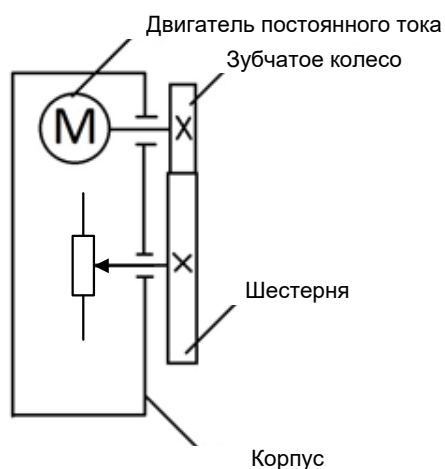


Рис. 14. Кинематическая схема типового звена манипулятора

Основным элементом звена любого манипулятора является двигатель или привод. Существует несколько основных типов двигателей, которые могли бы использоваться для приведения в движение звеньев манипулятора [26].

1. Сервопривод. Сервопривод – это привод с управлением через отрицательную обратную связь, позволяющую точно управлять параметрами движения. Сервоприводом является любой тип механического привода, имеющий в составе датчик (положения, скорости, усилия и т.п.) и блок управления приводом, автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике и устройстве согласно заданному внешнему значению. Основными достоинствами сервопривода являются: высокий крутящий момент за счет наличия редуктора, плавность работы, компактность, малый вес. Недостатки – низкая точность позиционирования, невысокая скорость вращения при большом крутящем моменте, высокая стоимость промышленных сервоприводов.

Типовая структура сервопривода показана на рис. 15.

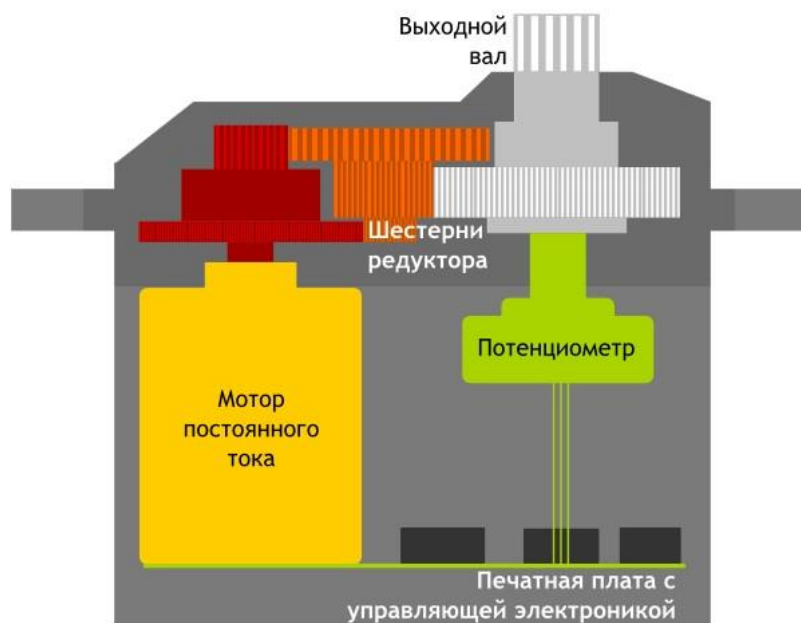


Рис. 15. Структура сервопривода

2. Шаговый двигатель. Шаговый двигатель – это синхронный бесщеточный двигатель с несколькими обмотками, в котором ток, подаваемый в обмотку статора, вызывает фиксацию ротора, а последовательное переключение обмоток двигателя вызывает дискретный (пошаговый) поворот ротора. Преимущества: основное преимущества шагового двигателя – это точность. При определенном числе переключений между обмотками ротор повернется строго на соответствующий угол. Еще одним плюсом является невысокая стоимость. К недостаткам можно отнести сильное увеличение веса двигателя при небольшом увеличении его мощности, снижение крутящего момента при увеличении скорости вращения, проскальзывание ротора, что ведет к последующим ошибкам в управлении. Для исключения проскальзывания ротора рекомендуется выбирать шаговый двигатель с запасом мощности.

В качестве привода для типового звена манипулятора выбираем сервопривод. Цена на промышленные сервоприводы достаточно высока. Поэтому для приведения в движение звеньев проектируемого робота были использованы сервоприводы (*standard size*), используемые в радиоуправляемых моделях и небольших роботах, но дополненные передаточным блоком. Их цена сопоставима с ценой на шаговые двигатели, однако сервоприводы обладают большим крутящим моментом. Точность позиционирования сервоприводов считаем достаточной для выполнения технологических операций переноса, сборки и покраски. Ввиду использования дополнительного передаточного блока с коэффициентом 1:7 и ограничением работы сервопривода встроенным потенциометром в диапазоне 180 градусов, ограничивающий потенциометр, а также блок управляющей электроники были удалены, т.е. сервоприводы с передаточными блоками были приведены к кинематической схеме типового звена манипулятора (рис. 14).

Общий вид типового звена манипулятора приведен на рис. 16.

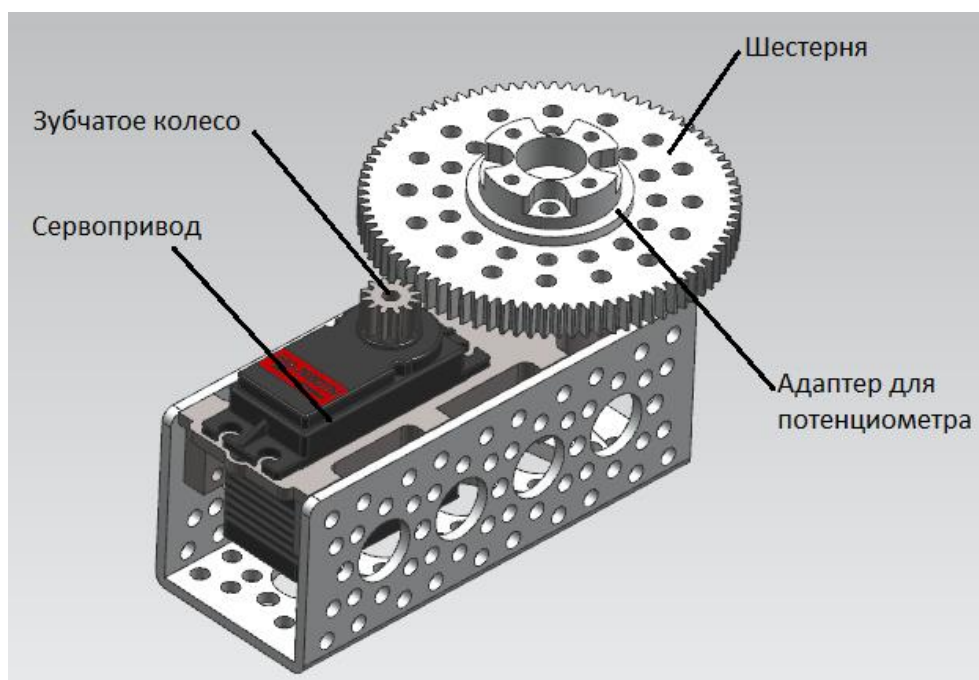


Рис. 16. Общий вид типового звена манипулятора

Первое звено манипулятора (рис. 17) содержит две степени свободы. Двигатель 1 осуществляет поворот последующих звеньев манипулятора, а двигатель 2 – наклон. Последующими звеньями манипулятора являются типовые звенья (рис. 16).

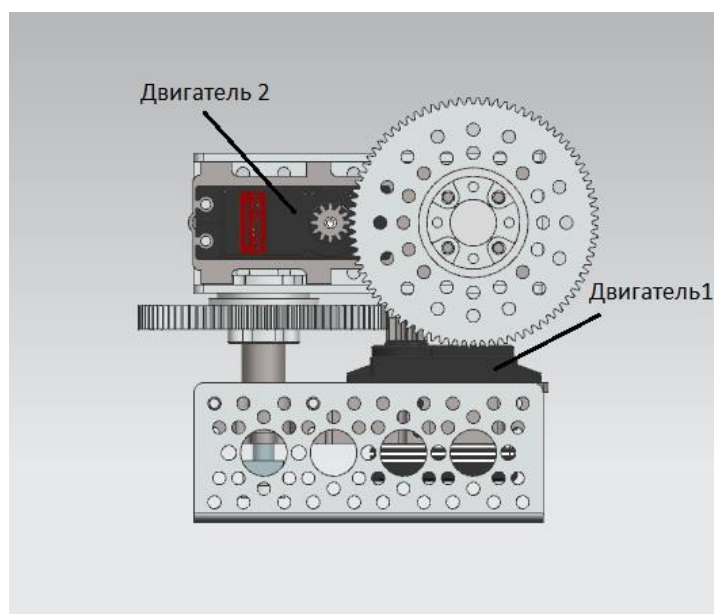


Рис. 17. Первое звено манипулятора

Первое звено манипулятора (рис. 17) устанавливается на блок линейного перемещения. Блок линейного перемещения представляет собой платформу, которая при помощи шагового двигателя может перемещаться по металлическим направляющим (рис. 18).

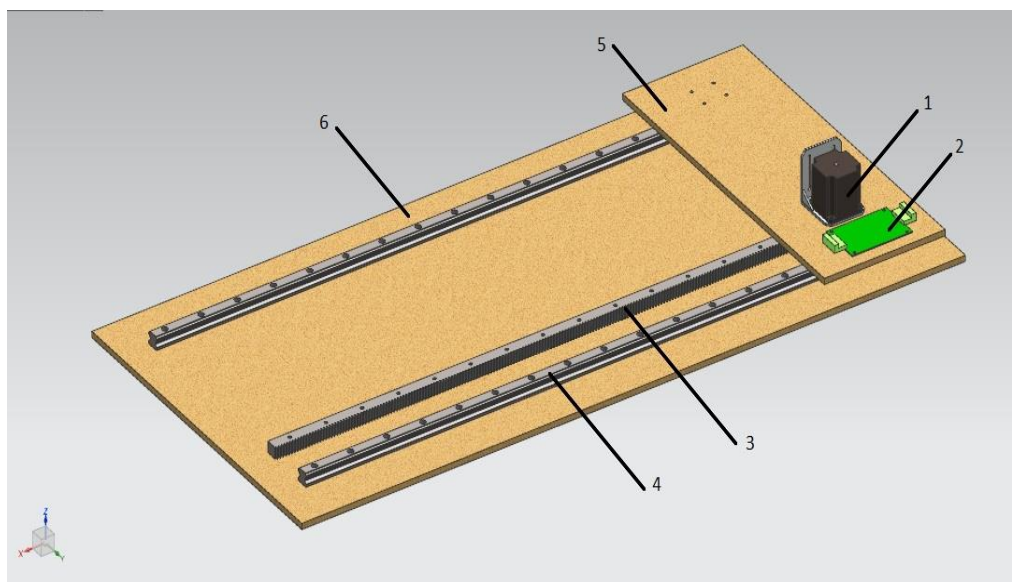


Рис. 18. Система линейного перемещения робота-манипулятора: 1 – Шаговый двигатель NEMA 23 (ST57-56); 2 – Драйвер шагового двигателя ST57-1; 3 – Зубчатая рейка M 1,5; 4 – Продольный рельс; 5 – Площадка манипулятора; 6 – База

В данном случае был выбран именно шаговый двигатель, так как при линейном перемещении высокий крутящий момент и массогабаритные показатели не играют большой роли. Данная платформа позволит перемещаться манипулятору на расстояние 1 метр по продольной оси. Управление шаговым двигателем осуществляется при помощи драйвера. Драйверы, шаговые двигатели и элементы системы линейного перемещения используются в подобных системах станков с ЧПУ.

В следующей работе для сконструированного робота-манипулятора будет рассмотрена интеллектуальная система управления на основе ПИД-регулятора с интеллектуальной настройкой в виде генетического алгоритма.

Список литературы

1. Корсаков В. С. Автоматизация производственных процессов. Учебник для вузов. – М. : Высшая школа, 1978. – С. 295.
2. Промышленные роботы в современном производстве // Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2011. – № 5. – С. 16-19.
3. ГОСТ 25686-85 Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. Термины и определения. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. – С. 6.
4. Рыбальченко Д. Типовые решения роботизированных технологических комплексов // Control Engineering Россия. – 2013. – № 1. – С. 68-74.
5. Применение роботов в аэрокосмической промышленности // Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2013. – № 5. – С. 26-30.
6. Успешное внедрение сварочных технологий и роботизированных решений фирмы Carl Cloos Schweissttechnik GmbH в сельхозмашиностроении // Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2013. – № 7. – С. 38-39.
7. Капустин Н. М., Кузнецов П. М., Схиртладзе А. Г. и др. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. – М. : Высш. шк., 2004. – С. 415.
8. Ёонг Ви Шенг. Какое автоматизированное решение лучше? // Современная электроника. – 2015. – № 1. – С. 34-36.
9. www.ifr.org.

10. <http://www.kuka-robotics.com>.
11. Bishop R. H. *Mechantronics An Introduction*. – Boca Raton : CRC Press, 2006. – P. 285.
12. Антонов А. Робототехника и встраиваемые системы // Современная электроника. – 2015. – № 1. – С. 14-17.
13. Авцинов И. А. Основы роботизации, гибких производственных систем, организационно технологического управления и транспортно складских систем. – Воронеж. : Воронежская государственная технологическая академия, 2009. – С. 94.
14. Javadi A. H. Manipulator Redundancy Reduction as a Tool for Reinforcing Motion Planning Using Genetic Algorithms // *Proceedings of the World Congress on Engineering*. – London, UK, 2-4 July, 2008. – Vol. II. – Pp. 1511-1516.
15. Jin Y. Decentralized Adaptive Fuzzy Control of Robot Manipulators // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1998. – Vol. 28. – № 1. – Pp. 47-57.
16. Leghmizi S. Takagi-Sugeno Fuzzy PD Controller for a 3-DOF Stabilized Platform // *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation Beijing*. – China, 6-8 July, 2012. – Pp. 108-112.
17. Li J., Ma H. Stochastic Neural Network Control of Rigid Robot Manipulator with Passive Last Joint // *International Conference on Control Cardiff*. – UK, 3-5 September 2012. – Pp. 662-667.
18. Xia Y., Wang J. A Dual Neural Network for Kinematic Control of Redundant Robot Manipulators // *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics*. – 2001. – Vol. 31. – № 1. – Pp. 147-154.
19. Andromeda T., Yahya A., Khamis N., Baharom A., Rahim M. PID Controller Tuning by Particle Swarm Optimization on Electrical Discharge Machining Servo Control System // *4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems Kuala Lumpur*. – 12-14 June, 2012. – Pp. 51-55.
20. Ulyanov V. S., Panfilov S. A., Ulyanov S. V., Litvintseva L. V., Kurawaki I., Tanaka K. Principle of minimum entropy production in applied soft computing for advanced intelligent robotics and mechatronics // *Springer-Verlag. Soft Computing*. – 2000. – № 4. – Pp. 141-146.
21. Tanaka T., Ohwi J., Litvintseva L. V., Yamafuji K., Ulyanov S. V. Intelligent Control of a Mobile Robot for service Use in Office Buildings and Its Soft Computing Algorithms // *Journal of Robotics and Mechatronics*. – 1996. – Vol. 8. – № 6. – Pp. 538-554.
22. Panda R. C. *Introduction to PID Controllers – Theory, Tuning and Application to Frontier Areas*. — Rijeka, Croatia : InTech, 2012. – P. 258.
23. Михайлов В. С. Теория управления. – К : Выща школа, 1988. – С. 312.
24. Николаева А. В., Ульянов С. В. Интеллектуальное управление роботом-манипулятором на основе мягких вычислений // Программные продукты и системы. – 2013. – № 4. – С. 150-155.
25. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. – С. 616.
26. Sahin, F. *Practical and experimental robotics* / F. Sahin, P. Kachroo. – Boca Raton :CRC Press, 2008. – P. 439.