

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

**Николаева Алёна Валериановна<sup>1</sup>, Петров Сергей Павлович<sup>2</sup>,  
Мишин Андрей Анатольевич<sup>3</sup>, Ульянов Сергей Викторович<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Студент;

ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: nikolaevaav@lenta.ru.

<sup>2</sup>Студент;

ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: msgtome@bk.ru.

<sup>3</sup>Кандидат технических наук, доцент института САУ;

ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: andrmish@yandex.ru.

<sup>4</sup>Доктор физико-математических наук, профессор;

PronetLabs;  
ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

На основе результатов моделирования интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором показано преимущество использования предлагаемого способа установки параметров регулирования перед классическими методами теории автоматического управления применительно к сложно-структурированным объектам управления.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления, система автоматического управления, генетический алгоритм.

## **DEVELOPMENT OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEM OF A ROBOT-MANIPULATOR USING A GENETIC ALGORITHM**

**Nikolaeva Alyona<sup>1</sup>, Petrov Sergey<sup>2</sup>, Mishin Andrey<sup>3</sup>, Ulyanov Sergey<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Student;

Dubna International University of Nature, Society, and Man,  
Institute of system analysis and management;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: nikolaevaav@lenta.ru.

<sup>2</sup>Student;

Dubna International University of Nature, Society, and Man,  
Institute of system analysis and management;

141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: msgtome@bk.ru.

<sup>3</sup>Candidate of Science in Engineering, associate professor of Institute of system analysis and management;  
Dubna International University of Nature, Society, and Man,  
Institute of system analysis and management;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: andrmish@yandex.ru.

<sup>4</sup>Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;  
Dubna International University of Nature, Society, and Man,  
Institute of system analysis and management;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

*Using the simulation results of intelligent control system of robot-manipulator we demonstrate the advantage of using the proposed method of selection regulations parameters versus the classical method of theory automatic control applicable to complex-structured control objects.*

Keywords: intelligent control system, system of automatic control, object of control.

## **Введение**

Развитие различных технических средств и достижений науки отражается в непрерывном расширении применения систем автоматического управления (САУ). Постоянно обновляющиеся возможности технической реализации создают новые постановки задач анализа и синтеза систем управления. В то же время, увеличиваются требования к работоспособности САУ в условиях недостаточной априорной и текущей информации.

Задачей оптимального управления объектом в условиях неполной информацией, является определение практически реализуемого управления, удовлетворяющего заданному множеству критериев качества управления.

Применение аналитических методов конструирования систем управления позволяет решить целый класс задач, однако при этом необходимо знание всей информации об объекте, внешней среде и их процессах взаимодействия. Сложность описания моделей функционирования современных САУ часто не позволяет предоставить полную информацию о внутренних и внешних факторах, влияющих на динамическое поведение исследуемой системы. Однако в большинстве случаев модель системы учитывает области изменения параметров и общие характеристики отдельных элементов, без конкретизации непосредственно параметров и характеристик. Таким образом, использование аналитических методов для сложных систем в реальных условиях функционирования сопряжено с вычислительной сложностью, а зачастую является невозможным.

Методы, характеризующиеся введением дополнительных звеньев, обобщающих параметры объекта управления (ОУ), рабочего пространства и взаимосвязей между ними и оптимизирующие систему управления с точки зрения качественных критериев, называются алгоритмическим конструированием нестационарных систем управления [4, 7].

В данной статье используется метод построения интеллектуальной системы управления (ИСУ) с использованием генетического алгоритма (ГА) для трехзвенного робота-манипулятора, предполагающий введение в САУ дополнительных звеньев с целью оптимизации управления относительно выбранного критерия качества.

В первом разделе данной статьи приведены основные принципы построения систем управления. Во втором разделе рассматривается классическая методика нахождения параметров САУ. В третьем разделе предлагается способ реализации ИСУ на основе методов алгоритмического конструирования. В четвертом приведена математическая модель выбранного ОУ (трехзвенного робота-манипулятора), а также ее реализация в среде *Matlab/Simulink* в составе модели системы управления. В пятом разделе приведены результаты моделирования управления на основе сконструированных систем (классической САУ и ИСУ). В заключительном разделе резюмируются итоговые сравнения качества управления.

### 1. Общие принципы конструирования систем управления

Система управления представляет собой совокупность одного или нескольких объектов управления и управляющей системы. В общем случае, система управления состоит из звена регулирования (P), ОУ, а также измерительной системы (ИС) в цепи обратной связи (ОС). На рис. 1 приведена структурная схема системы управления, где  $e_{ref}$  – воздействующий (задающий) сигнал,  $e_y$  – регулируемая величина,  $\varepsilon$  – ошибка управления,  $u$  – управляющее воздействие P на ОУ,  $m(t)$  – внешнее воздействие среды (шум) [9].

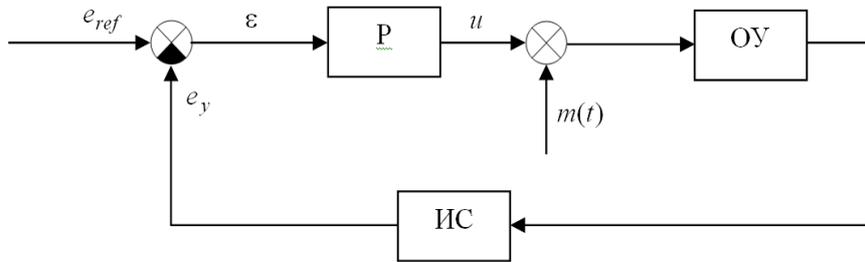


Рис. 1. Структурная схема системы управления

Наличие ОС свидетельствует о том, что САУ замкнута, т.е. воздействующие сигналы зависят от реакции системы на эти сигналы.

Системы управления делят на два класса [10]. Система называется системой регулирования, если целью является поддержка постоянного значения физической переменной при наличии возмущений. Система называется следящей (сервомеханизм) в случае, если физическая величина должна отслеживать или воспроизводить некоторую заданную функцию времени.

В данной статье моделируется следящая система управления трехзвенным роботоманипулятором для решения задачи позиционирования устройства захвата в заданной точке рабочего пространства.

Для обеспечения заданных динамических показателей в замкнутых САУ находят применение различные типы регуляторов. Наиболее широкое распространение получили пропорциональные, пропорционально-интегральные и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы. Интегральная составляющая регулятора позволяет устранить в системе статическую ошибку, а дифференциальная составляющая – улучшить динамические показатели, форсируя переходный процесс.

Передаточная функция аналогового ПИД-регулятора, реализованного на операционном усилителе (рис. 2) представляется в виде [6]:

$$W(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = \frac{Z_{oc}}{Z_{вх}} = \frac{R_1 C_1 + R_2 C_2}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2 p} + R_2 C_1 p.$$

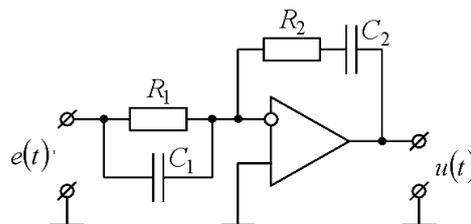


Рис. 2. Схема аналогового ПИД-регулятора

Закон изменения выходного сигнала ПИД-регулятора записывается следующим образом:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt},$$

где  $K_P = R_2/R_1 + C_1/C_2$  – коэффициент передачи пропорциональной части регулятора;  $K_I = \frac{1}{R_1 C_2}$  – постоянная интегрирования;  $K_D = R_2 C_1$  – постоянная дифференцирования.

Типовая переходная характеристика ПИД-регулятора для входного воздействия типа «единичный скачок» приведена на рис. 3.

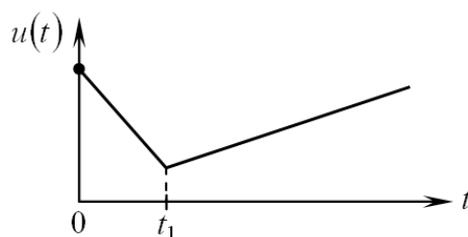


Рис. 3. Переходная характеристика ПИД-регулятора

На интервале времени  $[0, t_1]$  (рис. 3) в ПИД-регуляторе, осуществляются процессы масштабирования и дифференцирования входного сигнала, при  $t > t_1$  – процесс его интегрирования.

Задача управления в общем случае сводится к нахождению коэффициентов ПИД-регулятора  $K_P, K_I, K_D$ , при которых обеспечивается желаемый характер движения.

Аналитическое определение коэффициентов ПИД-регулятора невозможно без наложения ограничений на амплитуды сигнала управления и переходной характеристики. Кроме того, необходимо устанавливать взаимосвязи между коэффициентами  $K_P, K_I, K_D$ , что подразумевает четкое представление о характере динамических процессов.

Таким образом, классический способ требует полной информации в описании параметров модели исследуемого ОУ и внешней среды.

Рассмотрим в качестве примера классического управления выбор коэффициентов ПИД-регулятора из аналитически определенных диапазонов с использованием математической модели линейного цифрового ПИД-регулятора.

## 2. Выбор коэффициентов ПИД-регулятора на основе классической теории автоматического управления

В САУ при реализации алгоритма цифрового интегрирования может быть использовано интегрирование на основе трапецидальной аппроксимации (рис. 4).

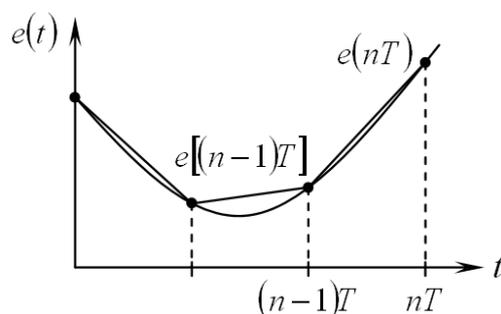


Рис. 4. Трапецидальная аппроксимация входного сигнала ПИД-регулятора

Величина, определяемая непрерывным идеальным интегратором – это площадь под кривой  $e(t)$ , между временами  $t = 0$  и  $t = nT$  (рис. 4). При трапецеидальной аппроксимации площадь  $u(nT)$  определяется как сумма

$$u(nT) = u[(n-1)T] + T\{e(nT) + e[(n-1)T]\}/2,$$

где  $u[(n-1)T]$  – площадь трапеций под кривой  $e(t)$  до момента времени  $t = (n-1)T$ ; вторая составляющая есть площадь трапеции на интервале  $[(n-1)T, nT]$ .

Полученное разностное уравнение определяет алгоритм цифрового интегрирования. Используя теорему сдвига во временной области  $Z$ -преобразования [5], получаем алгоритм интегрирования в виде

$$U(z) = z^{-1}U(z) + T[E(z) - z^{-1}E(z)]/2$$

и импульсную передаточную функцию интегратора

$$W(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{T}{2} \frac{z+1}{z-1}.$$

Если интегрирование выполнить по методу трапеций, а дифференцирование аппроксимировать выражением

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e(nT) - e[(n-1)T]}{T},$$

то в  $Z$ -форме импульсная передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_P + K_I \frac{T}{2} \frac{z+1}{z-1} + K_D \frac{z-1}{Tz}. \quad (1)$$

В результате преобразований передаточная функция ПИД-регулятора (1) может быть представлена в виде отношения двух полиномов:

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_1 - K_2 z^{-1} + K_3 z^{-2}}{1 - z^{-1}},$$

где коэффициенты (назовем их условными коэффициентами ПИД-регулятора)  $K_1 = K_P + TK_I/2 + K_D/T$ ;  $K_2 = K_P - TK_I/2 + 2K_D/T$ ;  $K_3 = K_D/T$ .

Обратный переход может быть выполнен с помощью следующих соотношений:

$$K_P = (K_1 + K_2 - 3K_3)/2, K_I = (K_1 - K_2 + K_3)/T, K_D = TK_3. \quad (2)$$

Условные коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  передаточной функции выбираются из условия обеспечения желаемого качества переходной характеристики микропроцессорной системы.

Исследование динамических свойств ПИД-регулятора, то есть влияния коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  на вид переходной характеристики, удобнее проводить во временной области в результате анализа переходных характеристик. Для этого составляем разностное уравнение ПИД-регулятора в виде (блок-схема приведена на рис. 5):

$$y_n = y_{n-1} + K_1 e_n - K_2 e_{n-1} + K_3 e_{n-2}.$$



где  $C$  – система кодирования: отображение пространства решений в некоторое пространство, на котором определены генетические операции;  $F$  – функция пригодности: критерий, определяющий качество индивида;  $P^0$  – начальная популяция: набор распределенных в пространстве кодирования элементов;  $\mu$  – размер начальной популяции: количество индивидов в популяции;  $\Omega(p^\Omega)$  – операция селекции, где  $p^\Omega$  – вероятность селекции: вероятностная операция для воспроизведения большего числа хромосом с большим значением функции пригодности в следующем поколении;  $\Gamma(p^\Gamma)$  – операция скрещивания, где  $p^\Gamma$  – вероятность скрещивания: вероятностная операция для обмена генетической информацией между индивидами, входящими в данную популяцию;  $\Delta(p^\Delta)$  – операция мутации, где  $p^\Delta$  – вероятность мутации: вероятностная операция для внесения новой информации в данную популяцию;  $\Psi$  – условие остановки: условие завершения работы ГА.

Для демонстрации работы ИСУ была выбрана следующая математическая модель ГА:

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{бинарное кодирование,} \\
 \text{mean}(\min([\varepsilon_p^2, \varepsilon_l^2])), \\
 \{\text{rand}(0, 10^3), \text{rand}(0, 10^3), \dots, \text{rand}(0, 10^3)\}, \\
 200, \\
 \Omega(0, 5), \\
 \Gamma(0, 5), \\
 \Delta(0, 5), \\
 \text{количество итераций более 40}
 \end{array} \right\} \quad (4)$$

#### 4. Моделирование системы управления

Реализация модели системы управления в среде MatLab/Simulink представлена на рис. 7, где ОУ реализован в виде блока robot (увеличенный по размеру блок на рис. 7).

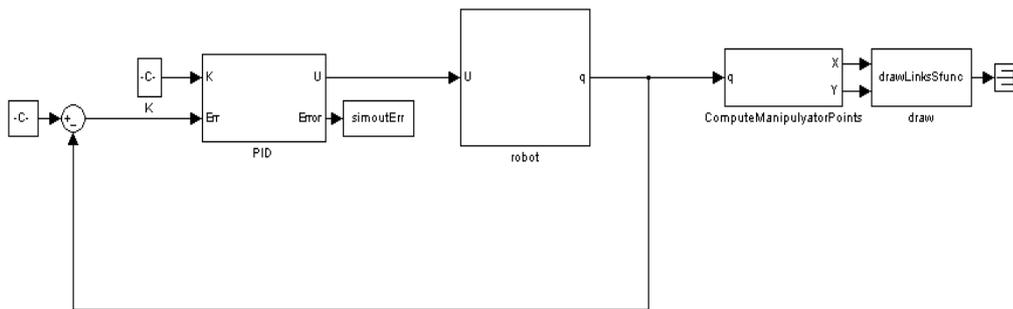


Рис. 7. Модель системы управления в MatLab/Simulink

В качестве ОУ выступает трехзвенный манипулятор (рис. 8), задачей которого является позиционирование устройства захвата в заданной точке  $(p_x, p_y)$ , что осуществляется установкой положений соединений манипулятора  $q_1, q_2, q_3$ , приводимых приводами в движение, на заданном уровне. Уравнение связи положений соединений и устройства захвата записывается следующим образом:

$$\begin{cases} p_x = l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) + l_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ p_y = l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) + l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \end{cases}$$

где  $l_1, l_2, l_3$  – длины звеньев.

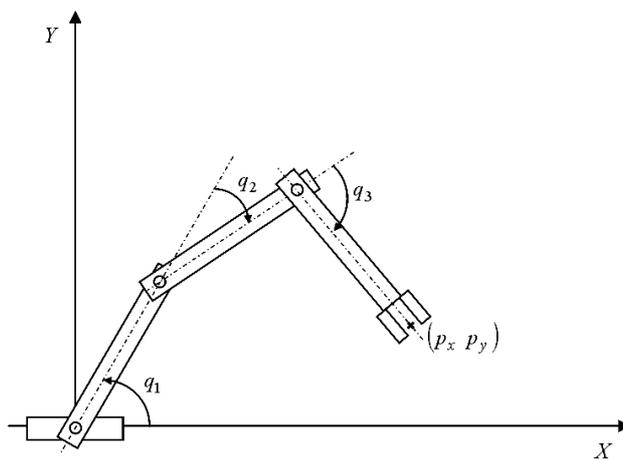


Рис. 8. Геометрическая модель трехзвенного манипулятора

Динамическая модель  $n$ -звенного манипулятора:

$$\tau(t) = D(q)\ddot{q}(t) + C(q, \dot{q})\dot{q}(t) + G(q),$$

где  $n$ -размерные  $q(t)$  и  $\tau(t)$  – векторы положения и вращающих моментов соединений,  $D(q)$  – матрица инерции размерностью  $n \times n$ ,  $C(q, \dot{q})\dot{q}$  –  $n$ -мерный вектор Кориолиса и центробежной силы,  $G(q)$  –  $n$ -мерный вектор сил земного притяжения. Порядок определения матриц  $D(q)$ ,  $C(q, \dot{q})$  и  $G(q)$  приведен в [2].

Таким образом, регулирование сводится к определению моментов вращения приводов соединений для точного позиционирования устройства захвата.

### 5. Сравнение качества управления роботом-манипулятором при использовании классической САУ и ИСУ

В разделе 2 на основе классической теории автоматического управления были получены диапазоны изменения условных коэффициентов (3), а также уравнения связи условных коэффициентов с коэффициентами ПИД регулятора (2), необходимые для выбора параметров САУ.

Для демонстрации работы САУ с помощью (2) и (3) создадим три набора коэффициентов ПИД регулятора (минимальные, максимальные и средние значения диапазонов условных коэффициентов).

Для реализуемой модели системы управления  $y_{\max} \leq 50, e \leq 2$ . Примем  $y_{\max} = 50, e = 2$ . Период дискретизации  $T = 0,1$ . Тогда в соответствии с (2) и (3):

**1 набор:** минимальные значения диапазонов:

$$\begin{cases} 0 \leq (K_1 = 0) \leq 25, \\ -25 \leq (K_2 = -25) \leq 0, \\ -50 \leq (K_3 = -50) \leq -25. \end{cases}$$

$$K_p = 62,5, K_I = -250, K_D = -5.$$

**2 набор:** максимальные значения диапазонов:

$$\begin{cases} 0 \leq (K_1 = 25) \leq 25, \\ 25 \leq (K_2 = 50) \leq 50, \\ 25 \leq (K_3 = 50) \leq 50. \end{cases}$$

$$K_P = -37,5, K_I = 250, K_D = 5.$$

**3 набор:** средние значения диапазонов:

$$\begin{cases} 0 \leq (K_1 = 12,5) \leq 25, \\ 0 \leq (K_2 = 12,5) \leq 25, \\ -12,5 \leq (K_3 = 0) \leq 12,5. \end{cases}$$

$$K_P = 12,5, K_I = 0, K_D = 0.$$

Т.к. регулируемая величина (положения соединений  $q = [q_1, q_2, q_3]^T$ ) представляет собой вектор-столбец, матрица коэффициентов ПИД-регулятора будет иметь вид:

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} K_{P1} & K_{P2} & K_{P3} \\ K_{D1} & K_{D2} & K_{D3} \\ K_{I1} & K_{I2} & K_{I3} \end{bmatrix},$$

где  $i = \overline{1,3}$  – номер соответствующего набора,  $K_{P1} = K_{P2} = K_{P3} = K_P$ ,  $K_{D1} = K_{D2} = K_{D3} = K_D$ ,  $K_{I1} = K_{I2} = K_{I3} = K_I$ .

Таким образом, для демонстрации работы САУ получены три матрицы коэффициентов:

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 62,5 & 62,5 & 62,5 \\ -5 & -5 & -5 \\ -250 & -250 & -250 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} -37,5 & -37,5 & -37,5 \\ 5 & 5 & 5 \\ 250 & 250 & 250 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} 12,5 & 12,5 & 12,5 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

На рис. 9-17 представлены временные диаграммы положений соединений  $q_1, q_2, q_3$  (текущее и желаемое положение) при использовании матрицы  $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$  и  $\mathbf{K}_3$  коэффициентов ПИД-регулятора.

Для оценки качества управления введем два критерия.

1. Для физической реализуемости модели необходимо задать рабочий диапазон положений соединений манипулятора:  $q_i \in [-\pi, \pi]$ ,  $i = 1, 2, 3$ . В случае невыполнения данного критерия дальнейший анализ прекращается.

2. Задача управления с точки зрения точности позиционирования будет считаться решенной в том случае, если переходные процессы по окончании сотого периода дискретизации будут завершены с ошибками позиционирования не превышающими 0,001 радиан на последнем периоде.

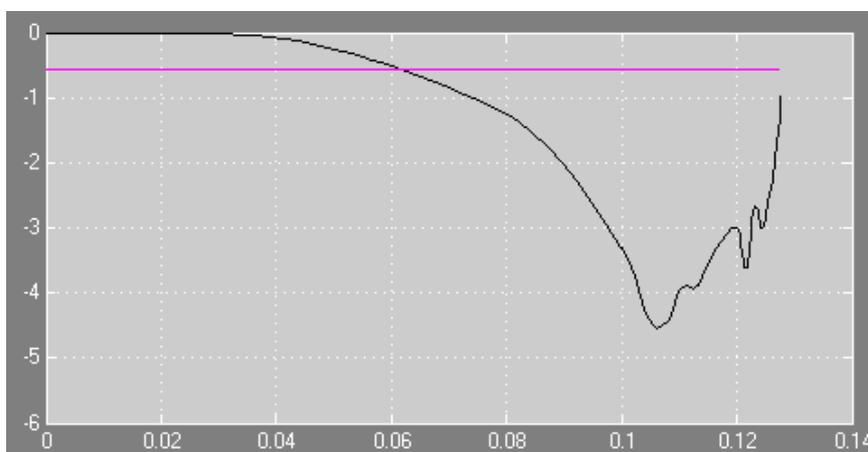


Рис. 9. Положение первого соединения  $q_1$  при использовании матрицы коэффициентов  $\mathbf{K}_1$

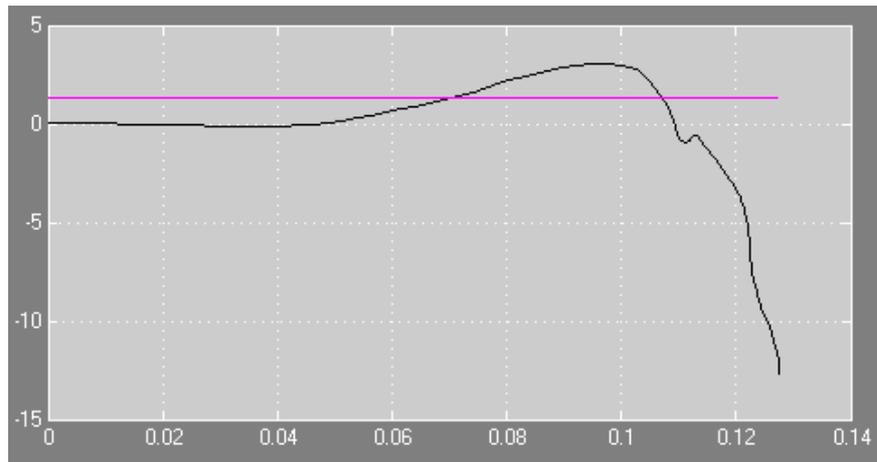


Рис. 10. Положение второго соединения  $q_2$  при использовании матрицы коэффициентов  $K_1$

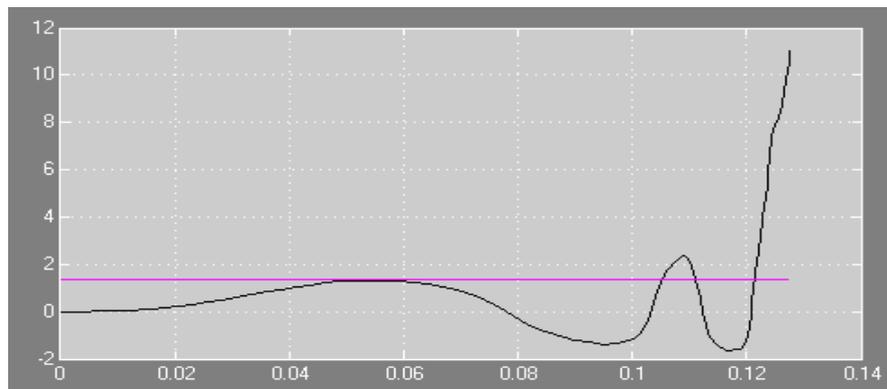


Рис. 11. Положение третьего соединения  $q_3$  при использовании матрицы коэффициентов  $K_1$

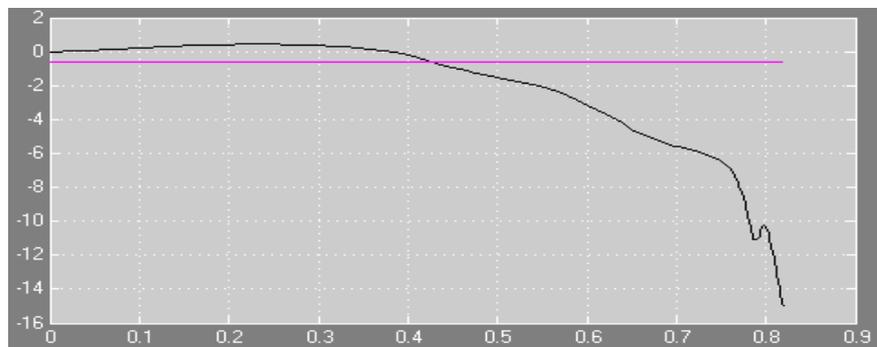


Рис. 12. Положение первого соединения  $q_1$  при использовании матрицы коэффициентов  $K_2$

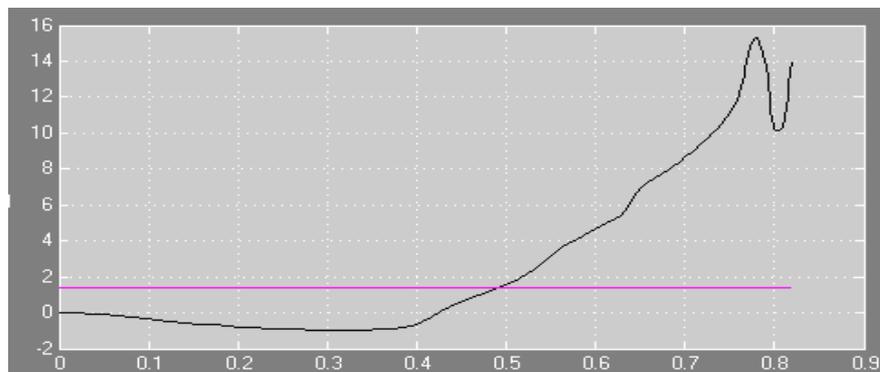


Рис. 13. Положение второго соединения  $q_2$  при использовании матрицы коэффициентов  $K_2$

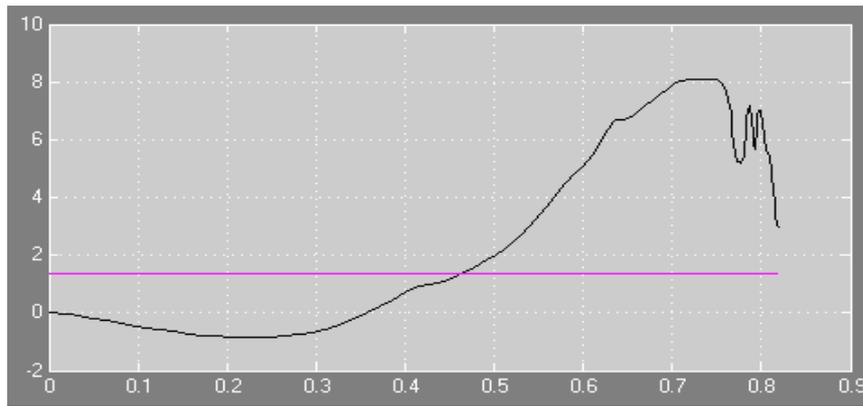


Рис. 14. Положение третьего соединения  $q_3$  при использовании матрицы коэффициентов  $K_2$

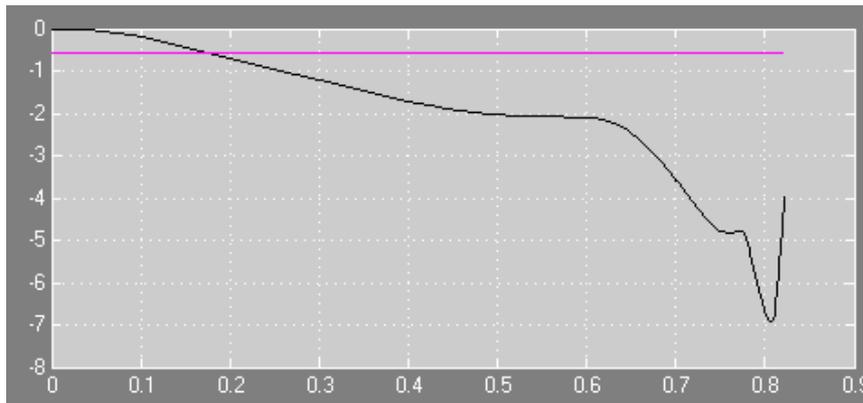


Рис. 15. Положение первого соединения  $q_1$  при использовании матрицы коэффициентов  $K_3$

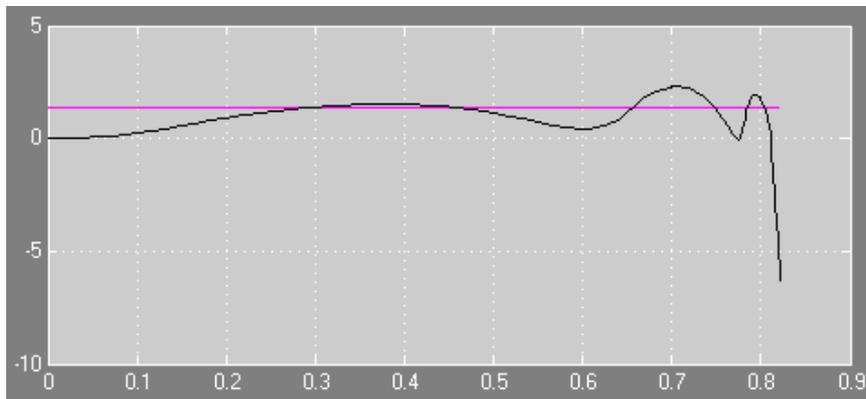


Рис. 16. Положение второго соединения  $q_2$  при использовании матрицы коэффициентов  $K_3$

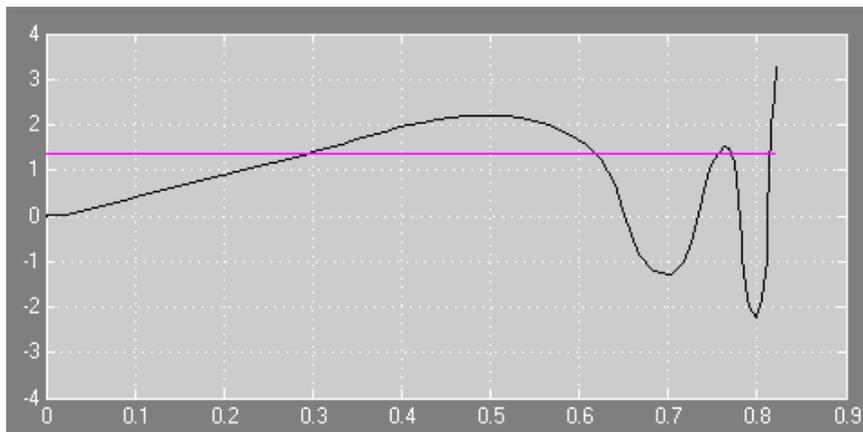
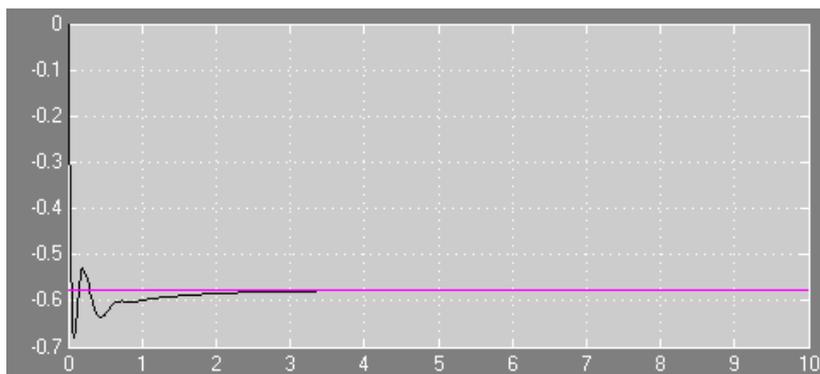
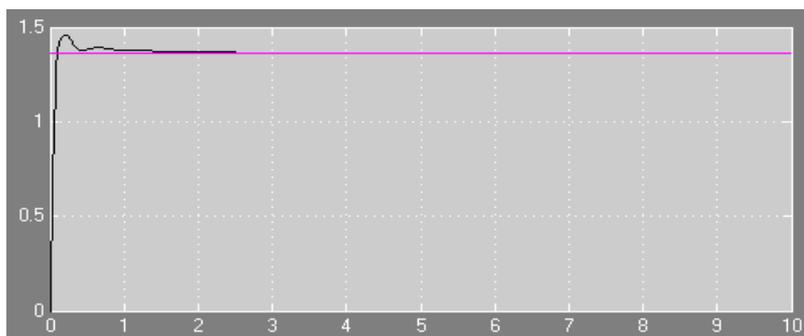
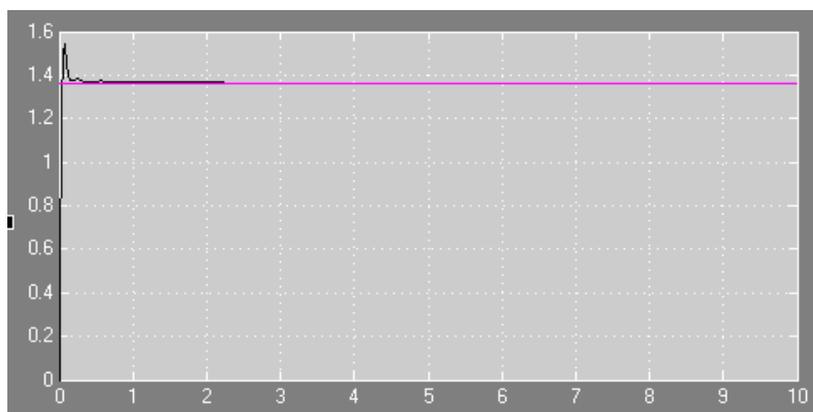


Рис. 17. Положение третьего соединения  $q_3$  при использовании матрицы коэффициентов  $\mathbf{K}_3$ 

На рис. 18-20 представлены временные диаграммы положений соединений  $q_1, q_2, q_3$  (текущее и желаемое положение) в модели ИСУ.

Полученная в соответствии с математической моделью ГА (4) матрица коэффициентов ПИД-регулятора  $\mathbf{K}_{ICS}$  имеет вид:

$$\mathbf{K}_{ICS} = \begin{bmatrix} 982,405 & 970,674 & 995,112 \\ 60,6061 & 44,9658 & 15,6403 \\ 995,112 & 1000 & 776,149 \end{bmatrix}$$

Рис. 18. Положение первого соединения  $q_1$  при использовании матрицы коэффициентов  $\mathbf{K}_{ICS}$ Рис. 19. Положение второго соединения  $q_2$  при использовании матрицы коэффициентов  $\mathbf{K}_{ICS}$ Рис. 20. Положение третьего соединения  $q_3$  при использовании матрицы коэффициентов  $\mathbf{K}_{ICS}$ 

В таблице 1 с учетом введенных критериев приведен сравнительный анализ качества управления трехзвенным роботом-манипулятором классической САУ (три варианта управления в зависимости от выбора матрицы коэффициентов) и ИСУ.

Таблица 1. Сравнение качества управления САУ и ИСУ

		Критерий 1		Критерий 2		Решение задачи управления
		$q_2 < 3,14$	$q_3 < 3,14$	$\max \varepsilon(100T) $	$\max \varepsilon(100T)  < 0,001$	
САУ	$K_1$	-	-	анализ не проведен		-
	$K_2$	-	-			-
	$K_3$	-	-			-
ИСУ	$K_{ICS}$	+	+	0,0000999452	+	+

Таким образом, для сложного объекта управления таким как робот-манипулятор, применение ИСУ, в отличие от классической САУ, позволяет достичь цели управления в поставленной задаче управления.

## Заключение

В данной работе предложен метод выбора параметров систем управления сложными объектами на основе ГА. С использованием данного метода была сформирована модель ИСУ. Посредством моделирования управления трехзвенным роботом-манипулятором продемонстрировано качество разработанного алгоритма в сравнении с классической САУ, параметры которой получены аналитически на основе математической модели линейного цифрового регулятора.

Аналитическое решение обратной задачи динамики требует определения описания ОУ, внешней среды и характера их взаимодействия до начала моделирования. Однако изменение характеристик ОУ в зависимости от параметров среды функционирования, технологических особенностей и конструкторской реализации ставят под сомнение универсальность приложения классической САУ. Результаты моделирования показали, что классическая САУ в применении к сложноструктурированному ОУ не справляется с задачей управления (по критериям, введенным в разделе 5).

Таким образом, если с помощью аналитических методов, используемых для построения классической САУ, можно создать оптимальную систему только на стадии проектирования, то с помощью методов алгоритмического конструирования можно создавать ИСУ с дополнительными звеньями, оптимизирующими работу системы в процессе функционирования. Последний вариант реализации позволяет избежать предварительного анализа информации о системе управления, среде, внутренних и внешних процессах взаимодействия. Сбор данных и их анализ происходит непосредственно в процессе функционирования ИСУ, что обеспечивает адаптацию системы в случае изменения ее характеристик, параметров внешней среды и ОУ в процессе работы.

## Список литературы

1. Li Y. and Liu Y, Trajectory tracking control considering simultaneous motions of a modular manipulator and a mobile platform // ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering. – Hyatt Regency, Long Beach, California, USA, September, DETC'2005, 2005.
2. Ramos M. C., Koivo Jr. and A. J. Fuzzy Logic-Based Optimization for Redundant Manipulators, IEEE Transactions on fuzzy systems. – Vol. 10. – 2002.
3. Manuel C. and Ramos, Jr, Fault-Tolerant Dynamic Control for Manipulators // Philippin engineering journal. – Vol. 27. – №1. – 2006.
4. Афанасьев В.Н. Динамические системы управления с неполной информацией. Алгоритмическое конструирование. – М.: КомКнига, 2007. – С. 216.

5. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. – С. 541.
6. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 448.
7. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Алгоритмическое конструирование оптимальных регуляторов при неполной информации о состоянии объекта возмущений // Изв. Ан СССР. Техническая кибернетика. – № 6. – 1972. – С. 188-199.
8. Ульянов С.В., Добрынин В.Н., Нефёдов Н.Ю., Петров С.П., Полунин А.С., Решетников А.Г. Генетические и квантовые алгоритмы. Ч.1: Инновационные модели в обучении // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2010. – №3. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/17.-0421000111\0030>.
9. Ульянов С.В. Робастные интеллектуальные системы управления: системный и структурный анализ // Нечеткие системы и мягкие вычисления. – Т. 3. – № 2. – 2008. – С. 15-31.
10. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – С. 616.
11. QSCOptimizer.com [Электронный ресурс]. URL: <http://qcoptimizer.com/>.