

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ

И

ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ

№ 1, 1998

Электронный журнал,  
рег. № П23275 от 07.03.97

<http://www.neva.ru/journal>  
e-mail: [diff@osipenko.stu.neva.ru](mailto:diff@osipenko.stu.neva.ru)

управление в нелинейных системах

## АЛГОРИТМЫ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЕНСАЦИОННЫХ УПРАВЛЕНИЙ НА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОСЕТЯХ

Т.В.Варядченко, А.А.Первозванский, Россия, 195251, Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, д.29

С.-Петербургский государственный технический университет

Кафедра "Механика и процессы управления"

e-mail: [control1@citadel.stu.neva.ru](mailto:control1@citadel.stu.neva.ru)

### Аннотация.

Предлагается реализация компенсационных управлений в нейробазисе, путем оценивания по методу локальной аппроксимации компенсационной части функций управлений как функций фазовых переменных на заранее заданной сетке. При этом рассматривается случай неизвестной динамики системы, когда вид функций, определяющих компенсационные слагаемые управлений не известен, и значения "измерений" в локальных оценках не могут быть вычислены. Предлагаются алгоритмы адаптивной настройки неизвестных коэффициентов в нейробазисе. В качестве примера рассмотрена задача управления простыми роботами и продемонстрирована возможность настройки управляющего параметра метода локальной аппроксимации такая, что значение желаемого показателя качества совпадения траекторий при идеальных управлениях и управлениях, реализованных на ИНС, может быть уменьшено в несколько раз при не слишком многоточечных сетках.

# 1. Метод локальной аппроксимации при реализации компенсационных управлений

В работе [1,2] и других указывалось, что нейроконтроллеры являются эффективным средством решения общей проблемы аппроксимации функций и рассматривался новый подход к организации нейровычислений на основе известной идеи локальной аппроксимации функций.

Оказывается круг проблем, решаемых на искусственных нейросетях с помощью этой идеи, более широк [2].

Рассмотрим задачу управления простым роботом,двигающимся по радиусу  $r$  и поворачивающемся вокруг своей оси по углу  $\phi$ . Простейшие уравнения его динамики имеют вид

$$m\ddot{r} - \frac{1}{2} \frac{\partial I}{\partial r} \dot{\phi}^2 = F_r \quad (1)$$

$$I(r)\ddot{\phi} + \frac{\partial I}{\partial r} \dot{r}\dot{\phi} = M_\phi \quad (2)$$

$$r(0) = r_0, \phi(0) = \phi_0, \dot{r}(0) = \dot{r}_0, \dot{\phi}(0) = \dot{\phi}_0,$$

где  $I(r)$ -момент инерции,  $m$ -масса,  $F_r$  и  $M_\phi$  - соответственно управляющая сила и момент,  $r_0, \phi_0, \dot{r}_0, \dot{\phi}_0$  - начальные условия.

Построим компенсационное управление по моменту в виде [5]

$$M_\phi = I(r)v + \frac{\partial I}{\partial r} \dot{r}\dot{\phi} \quad (3)$$

$$v = -k_\phi(\phi - \phi^*) - k_{\dot{\phi}}(\dot{\phi} - \dot{\phi}^*) \quad (4),$$

где  $\phi^*(t)$  и  $\dot{\phi}^*(t)$  - желаемые траектории - цель управления.

Подставляя (4), (3) в (2), получим

$$\ddot{\phi} + k_\phi(\phi - \phi^*) + k_{\dot{\phi}}(\dot{\phi} - \dot{\phi}^*) = 0 \quad (5)$$

Полагая  $\phi^* = const$ , получим уравнение, определяющее траекторию  $\phi(t)$  при управлении (3),(4) при переходе к желаемому положению равновесия  $\phi^*$ .

$$\ddot{\phi} + k_{\dot{\phi}}\dot{\phi} + k_\phi\phi = k_\phi\phi^* \quad (6)$$

Аналогично построим компенсационное управление по силе в виде

$$F_r = -p_r(r - r^*) - p_{\dot{r}}(\dot{r} - \dot{r}^*) - \frac{1}{2} \frac{\partial I}{\partial r} \dot{\phi}^2 \quad (7)$$

где  $r^*(t)$  и  $\dot{r}^*(t)$  - желаемые траектории. Подставляя (7) в (1), получим

$$m\ddot{r} + p_r(r - r^*) + p_{\dot{r}}(\dot{r} - \dot{r}^*) = 0 \quad (8)$$

Полагая  $r^* = const$ , получим уравнение, определяющее траекторию  $r(t)$  при управлении (3), (4) при переходе к желаемому положению равновесия

$$\ddot{r} + \frac{p_{\dot{r}}}{m}\dot{r} + \frac{p_r}{m}r = \frac{p_r}{m}r^* \quad (9)$$

Скажем теперь, что уравнения (6),(9) определяют траекторию  $r(t)$ ,  $\phi(t)$  при "идеальном управлении"(3),(4),(7), и в противовес "идеальному" управлению определим управление, реализуемое в нейробазисе следующим образом. Чтобы пояснить идею, для определенности положим в (3)

$$I(r) = I_0 + kr^2 \quad (10)$$

Управления (3),(4),(7) вычисляются этом случае по формулам

$$F_r = -p_r(r - r^*) - p_{\dot{r}}\kappa - \Delta F_r \quad (11)$$

$$M_\phi = -(I_0 + kr^2)k_\phi(\phi - \phi^*) - (I_0 + kr^2)k_{\dot{\phi}}\epsilon + \Delta M_\phi \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{r} &= \kappa, \quad \dot{\phi} = \epsilon \\ \Delta F_r &= k\epsilon^2 r \end{aligned} \quad (11')$$

$$\Delta M_\phi = 2kr\kappa\epsilon \quad (12')$$

Используя идею локальной аппроксимации, определим векторы  $x^\top = (r, \kappa, \epsilon)$  и  $x_1^\top = (r, \epsilon)$  и оценки для компенсационной части управлений (11'), (12'), а именно оценки [3]

$$\hat{F}_r = \frac{\sum \rho[(x_1 - x_1^j)/\delta] \Delta F_r^j}{\sum \rho[(x_1 - x_1^j)/\delta]} \quad (13)$$

$$\hat{M}_\phi = \frac{\sum \rho[(x - x^j)/\delta] \Delta M_\phi^j}{\sum \rho[(x - x^j)/\delta]} \quad (14),$$

где  $\rho(u)$  - функция весов такая, что  $\rho(u) \geq 0$ ,  $\rho(u) \rightarrow \infty$  при  $u \rightarrow \infty$ ,  $\delta > 0$  - управляющий параметр. Значения "измерений"  $\Delta F_r^j$  и  $\Delta M_\phi^j$  определяются на сетке по формулам (11'), (12').

Оценки (13),(14) являются частным случаем оценок метода локальной аппроксимации [3] и называются оценками Надарая-Ватсона и как показано в [1] реализуемы в нейробазисе. Могут быть использованы и другие локальные оценки, реализуемые в нейробазисе. Значения оценок  $\Delta \hat{F}_r$  и  $\Delta \hat{M}_\phi$  подставляются в формулы управлений  $F_r$  и  $M_\phi$  (11), (12).

Таким образом, соотношения (11) – (14) дают решение задачи управления простым роботом, реализуемым на ИНС. В общем случае для функции момента инерции  $I(r)$  в формулах для управлений (3), (4) также может быть построена оценка, причем если вид функций известен могут быть даны их оценки в нейробазисе, вычисленные заранее не зависимо от траектории.

Контрольное моделирование системы с предлагаемым алгоритмом управления производится путем интегрирования системы

$$\begin{aligned} \dot{r} &= \kappa \\ \dot{\phi} &= \epsilon \\ \dot{\kappa} &= \frac{kr}{m}\epsilon^2 + \frac{1}{m}(-p_r(r - r^*) - p_r\kappa) - \frac{1}{m}\Delta\hat{F}_r \\ \dot{\epsilon} &= -\frac{2kr\kappa\epsilon}{I_0+kr^2} - k_\phi(\phi - \phi^*) - k_\phi\epsilon + \frac{1}{I_0+kr^2}\Delta\hat{M}_\phi \end{aligned} \quad (15)$$

при заданных начальных условиях и оценках  $\Delta\hat{F}_r$  и  $\Delta\hat{M}_\phi$ , определяемых по соотношениям (13), (14), в которых значения  $\hat{F}_r^j$  и  $\hat{M}_\phi^j$  определяются по соотношениям (11'), (12') на задаваемых сетках, возможно, разных для  $\Delta\hat{F}_r$  и  $\Delta\hat{M}_\phi$ .<sup>1</sup>

## 2. Алгоритмы реализации компенсационных управлений в нейробазисе при неизвестной динамике системы

Рассмотрим теперь как реализовать в нейробазисе компенсационные управления в случае, когда вид функций, определяющих возможность вычисления значений  $\Delta F_r^j$  и  $\Delta M_\phi^j$  в оценках (14), (15) известен не полностью или не известен совсем.

Пусть не известно значение параметра  $k$ . Тогда в оценках (13), (14) этот параметр определим как настраиваемый. Зададим некоторое начальное значение  $k = k_0$ .

Обозначим

$$e_n = \int_0^T (r(t)^n - r(t)^n)^2 dt \quad (16)$$

<sup>1</sup>Значение параметра  $I_0$  может быть также не известно, но будем считать, что возможно задание некоторого среднего значения момента инерции  $I_{ср}$ , определяющего момент инерции в среднем на траектории системы, и использование этого значения при вычислении правой части (15) вместо точного значения  $I_0 + kr^2$ . Значение массы  $m$  можно также указать приближенно. Вместо оценок  $\Delta\hat{F}_r$  и  $\Delta\hat{M}_\phi$  в (15) можно вычислять оценки функций  $\frac{1}{m}\Delta F_r$  и  $\frac{1}{I_0+kr^2}\Delta M_\phi$ . Можно, как это уже указывалось полностью оценивать функцию момента инерции  $I(r)$ .

интегральное рассогласование по всей пройденной за время  $T$  траектории значений координаты  $r(t)^{\text{И}}$  при идеальном управлении и координаты  $r(t)^n$ , получающейся при управлении (11)-(14), которое вычисляется на каждом такте по формулам

$$\Delta \hat{F}_r^{(n)} = \frac{\sum \rho[(x_1 - x_1^j)/\delta] k^{(n)} r^j \epsilon^{j^2}}{\sum \rho[(x_1 - x_1^j)/\delta]} \quad (18)$$

$$\Delta \hat{M}_\phi^{(n)} = \frac{\sum \rho[(x - x^j)/\delta] k^{(n)} r^j \kappa^j \epsilon^j}{\sum \rho[(x - x^j)/\delta]} \quad (19)$$

В соотношениях (17), (18) как и прежде  $x_1^\top = (r, \epsilon)$ ,  $x^\top = (r, \kappa, \epsilon)$  и значения  $x_1^{j^\top} = (r^j, \epsilon^j)$ ,  $x^{j^\top} = (r^j, \kappa^j, \epsilon^j)$ ,  $j = \overline{1, M}$  определяются заданной сеткой. Значение неизвестного параметра  $k$  определяются адаптивной пошаговой процедурой

$$\begin{aligned} k^{(n)} &= k^{(n-1)} + \Delta k, \text{ если } e_n < e_{n-1} \\ k^{(n)} &= k^{(n-1)} - \Delta k, \text{ если } e_n > e_{n-1} \end{aligned} \quad (20)$$

Значение  $\Delta k$  есть некоторая задаваемая константа и начальное условие  $k^{(0)} = k_0$ . Вопрос о существовании и значении предела  $\lim_{i \rightarrow \infty} k^{(i)}$  мы пока оставим до следующих работ.

Соотношения (11),(12),(16)-(20) реализуемы в нейробазисе и определяют алгоритм компенсационного управления для ИНС при заданной степени неопределенности параметров системы. При моделировании в (16) сравнение идеальной траектории  $r(t)^{\text{И}}$  производится с траекторией, вычисляемой при интегрировании системы

$$\begin{aligned} \dot{r} &= \kappa \\ \dot{\phi} &= \epsilon \\ \dot{\kappa} &= \frac{k_0 r}{m} \epsilon^2 + \frac{1}{m} (-p_r (r - r^*) - p_{\dot{r}} \kappa) + \frac{1}{m} \Delta \hat{F}_r^{(n)} \\ \dot{\epsilon} &= -\frac{2k_0 r \kappa \epsilon}{I_{\text{ср}}} - k_\phi (\phi - \phi^*) - k_\epsilon \epsilon + \frac{1}{I_{\text{ср}}} \Delta \hat{M}_\phi^{(n)} \end{aligned}$$

в которой оценки  $\Delta \hat{F}_r$  и  $\Delta \hat{M}_\phi$  определяются соотношениями (18)-(20).<sup>2</sup>

Пусть степень неопределенности в задании динамики системы более значительна, именно вид функций  $\Delta F_r^j$  и  $\Delta M_\phi^j$  в оценках (13), (14) не

<sup>2</sup>См. предыдущую сноску .

определен даже с точностью до параметров, как это было в рассмотренном выше варианте. Тогда оценки (13), (14) могут быть определены в виде

$$\Delta \hat{F}_r^{(n)} = \frac{\sum_{j=1}^M \rho[(x_1 - x_1^j)/\delta] (c_r^j)^{(n)}}{\sum_{j=1}^M \rho[(x_1 - x_1^j)/\delta]} \quad (21)$$

$$\hat{M}_\phi^{(n)} = \frac{\sum_{j=1}^M \rho[(x - x^j)/\delta] (c_\phi^j)^{(n)}}{\sum_{j=1}^M \rho[(x - x^j)/\delta]} \quad (22)$$

где  $c_r^j$  и  $c_\phi^j$ ,  $j = \overline{1, M}$ , ( $M$  - количество точек сеток, может быть различным) – теперь неизвестные коэффициенты. Будем их настраивать следующим образом, начиная с некоторым образом в силу какой-то априорной информации о динамике системы заданных начальных значений  $(c_r^j)^{n-1}$   $(c_\phi^j)^{n-1}$ ,  $n = 1$ . Вычислим значение критерия качества (16)  $e_{n-1}$ ,  $n = 1$ . Начнем настройку с первого коэффициента,  $j = 1$ . Сформируем

$$(c_r^j)^n = (c_r^j)^{n-1} + \Delta c_r, \quad (24)$$

$$(c_\phi^j)^n = (c_\phi^j)^{n-1} + \Delta c_\phi, \quad (25)$$

где  $\Delta c_r$  и  $\Delta c_\phi$  - некоторые заданные величины, и вычислим новое значение критерия качества  $e_n$ , полученное при управлении с оценками (22), (23) при новых значениях коэффициентов  $c$ .

Если значение  $e_n < e_{n-1}$  сформируем

$$(c_r^j)^{n+1} = (c_r^j)^n + \Delta c_r, \quad (26)$$

$$(c_\phi^j)^{n+1} = (c_\phi^j)^n + \Delta c_\phi, \quad (27)$$

и продолжим по тому же  $j$ .

Если значение  $e_n > e_{n-1}$  сформируем

$$(c_r^j)^{n+1} = (c_r^j)^n - \Delta c_r, \quad (28)$$

$$(c_\phi^j)^{n+1} = (c_\phi^j)^n - \Delta c_\phi, \quad (29)$$

и перейдем к новому  $j$ , т. е. будем настраивать следующий коэффициент. Продолжим процедуру до тех пор пока она не остановится на значении  $j = M$  т.е. при настройке последнего коэффициента. Затем продолжим ее, уменьшив, например, шаг спуска вдвое, т.е. положив  $\Delta c_r = \Delta c_r/2$ ,  $\Delta c_\phi = \Delta c_\phi/2$ . Остановка процедуры производится, когда шаг спуска уменьшится до заданного значения. В этом варианте неопределенности системы по

сравнению с процедурой (20) имеет место уже не один, а  $2M$  настраиваемых параметров. Заметим, что значения  $c_r$  и  $c_\phi$ , получаемые по приведенной процедуре (24)-(29), отличаются между собой в силу различия начальных условий и различия в шагах спуска  $\Delta c_r$ ,  $\Delta c_\phi$ . Кроме того, сетки при построении оценок (22) и (23), вообще говоря, могут использоваться различные. Соотношения (22)-(29) определяют алгоритм реализации компенсационного управления в нейробазисе при полной неопределенности в задании параметров динамики системы. Моделирование системы производится аналогично предыдущему случаю.

Отметим в заключении, что рассматриваемая простейшая манипуляционная система (1), (2) взята лишь с целью наиболее ясно представить предлагаемые идеи и алгоритмы. Так, известный робот "PUMA 550/560" описывается в первом приближении следующими уравнениями [4]

$$A(q)\ddot{q} + C_1(q_1, \dot{q}_1)\dot{q}_1 + g(q) = u$$

В этой модели:

- $q_1 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$  – углы поворота звеньев;
- $D(q_1) = \begin{bmatrix} a_1 + 2a_2 \cos(q_{1_2}) & a_3 + a_2 \cos(q_{1_2}) \\ a_3 + a_2 \cos(q_{1_2}) & a_3 \end{bmatrix}$ ;
- $C(q, \dot{q})\dot{q} = \begin{bmatrix} -a_2 \dot{q}_{1_2} (2\dot{q}_{1_1} + \dot{q}_{1_2}) \sin(q_{1_2}) \\ a_2 \dot{q}_{1_1}^2 \sin(q_{1_2}) \end{bmatrix}$ ;
- $g(q_1) = \begin{bmatrix} (m l_2 + m_2 l_{c_2}) g \cos(q_{1_1} + q_{1_2}) + (m_1 l_{c_1} + m_2 l_1 + m l_1) g \cos(q_{1_1}) \\ (m l_2 + m_2 l_{c_2}) g \cos(q_{1_1} + q_{1_2}) \end{bmatrix}$ ;
- $J = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix}$ ;
- $A(q) = D(q) + J$
- $a_1 = m (l_1^2 + l_2^2) + m_1 l_{c_1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c_2}^2) + J_{c_1} + J_{c_2} + \frac{J_2}{i^2}$ ;
- $a_2 = l_1 (m l_2 + m_2 l_{c_2})$ ;
- $a_3 = m l_2^2 + m_2 l_{c_2} + J_{c_2}$ .

При составлении уравнений движения учитывались следующие параметры системы:  $l_1$  и  $l_2$  – длины звеньев,  $l_{c_1}$  и  $l_{c_2}$  – координаты центров инерции,  $m_1$  и  $m_2$  – массы звеньев,  $m$  – масса схвата с грузом,  $J_{c_1}$  и  $J_{c_2}$  – моменты инерции звеньев относительно осей, проходящих через центры масс звеньев,  $J_1$  и  $J_2$  – моменты инерции роторов двигателей, приведенные к осям шарниров (считается, что первый двигатель установлен на основании, а полная масса второго двигателя, установленного на первом звене, учтена в соответствующих параметрах первого звена),  $i$  – передаточное отношение второго двигателя. Ясно, что если аналогично предыдущему определить ”идеальное”управление  $u$  в виде

$$u = A(q)[-k_{\dot{q}}\dot{q} - k_q(q - q^*)] + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)$$

мы получим движение системы по уравнению

$$\ddot{q} + k_{\dot{q}}\dot{q} + k_q(q - q^*) = 0$$

- ”идеальное движение”. Строя аналогично предыдущему оценки функции  $F(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q}) + g(q)$  и аппроксимируя аналогично матрицу  $A(q)$ , можно построить алгоритмы компенсационных управлений в нейробазисе. При этом в упрощенном варианте, параметры, необходимые для определения матрицы  $A(q)$  задаются приближенно, а функция  $\cos$ , необходимая для аппроксимации матрицы  $A(q)$  просто однажды вычисляется в нейробазисе.

### 3. Численные результаты

Прежде всего следует отметить, что управление вида (3),(4) -известный ПД-регулятор- даже если вообще положить компенсационную часть его равной нулю, переводит систему в положение равновесия [5]. Учет компенсационных слагаемых позволяет приблизить траекторию перехода к траектории при ”идеальным”управлении. Очевидно, различие существенно, если прежде всего ”величина”компенсационных слагаемых существенна. Для системы (1),(2) эта величина определяется значением коэффициента  $k$  в модели (10) для момента инерции. На рис.1 представлены результаты моделирования системы (1),(2). Одно решение соответствует ”идеальному”управлению (3),(4),(7) и легко узнаваемо, второе – со значительным перерегулированием по  $r$  и  $\dot{r}$  – управлению (3),(4),(7) без компенсационных слагаемых. На рисунке приведены зависимости  $r(t), \dot{r}(t), \dot{\phi}(t), \phi(t)$ , полученные при начальных условиях  $r(0) = 1, \dot{r}(0) = 0, \dot{\phi}(0) = 0, \phi(0) = 1$  и



следующих значениях параметров динамики системы и управления:  $k = 100$ ,  $I_0 = 1$ ,  $m = 1$ ,  $k_\phi = 1$ ,  $k_{\dot{\phi}} = 2.5$ ,  $p_r = 1$ ,  $p_{\dot{r}} = 2.5$ ,  $r^* = 0.5$ ,  $\phi^* = 0.5$ . Интервал интегрирования 13 сек., шаг интегрирования 0.1 сек. Как видно, при таком значении параметра  $k = 100$  наблюдается значительное перерегулирование по  $r$  и  $\dot{r}$  при использовании ПД-регулятора без компенсации. Как показали проведенные численные эксперименты использование предлагаемых алгоритмов компенсационного управления позволяет улучшить качество совпадения переходных процессов, однако в зависимости от настройки управляющего параметра  $\delta$  в оценках (18),(19),(21),(22) и в зависимости от расположения и густоты сетки относительно "идеальной"траектории. Нарушения в точности (например, даже смещение положения равновесия) возможно по следующим причинам:

а) плохая настройка управляющего параметра  $\delta$ : задание слишком больших значений приводит к значительным ошибкам в установившемся режиме и другому характеру переходного процесса. В этом случае оценки поверхностей гладкие, но смещенные; задание слишком малых значений управляющего параметра приводит к негладким оценкам.

б) плохое расположение сетки оценивания относительно идеальной траектории. Сетка должна охватывать с достаточным запасом все значения идеального желаемого процесса. Полезно сгущение сетки около желаемого положения равновесия. Это дает лучшую точность в установившемся режиме. Таким образом, траектория при идеальном управлении должна быть рассчитана заранее, что позволит оптимальным образом расположить сетку оценивания для получения наилучшей точности даже при не слишком густой сетке.

в) слишком редкая сетка оценивания

Результаты моделирования иллюстрируют рис.1 и таблица 1. В таблице 1 показано как изменялось значение показателя качества (16) при использовании алгоритма (21)-(29) при указанных выше начальных условиях, параметрах системы, контура управления и сетке измерений, формируемой с помощью датчика случайных чисел по гауссовскому закону с центром в положении равновесия и параметрами разброса, согласованными с "идеальной"траекторией. Число точек сетки  $5 \times 5 \times 5 \times 5$ ,  $\delta = 0.05$ . В таблице указан шаг спуска и число настроенных коэффициентов. Начальные условия для настраиваемых коэффициентов устанавливались в соответствии с гипотезой (10) при значении  $k = 1$ , что в 100 раз отличается от истинного значения.

На рис.1 вместе с зависимостями, соответствующими идеальному управлению и управлению без компенсации приведены также соответствующие минимальному показателю качества зависимости  $r(t), \dot{r}(t), \dot{\phi}(t), \phi(t)$ . Как видно в процессе настройки удалось в несколько раз снизить показатель качества по сравнению с начальным и уменьшить перерегулирование, особенно для радиуса  $r(t)$ . Зависимости  $\dot{\phi}(t)$  и  $\phi(t)$  для всех трех случаев управления практически совпадают.

Описание всех проведенных модельных экспериментов как по алгоритму (18)-(20) так и по алгоритму (21)-(29) заняло бы слишком много времени. Скажем только, что хотя и не удается достигнуть блестящих результатов, однако в рамках введенных показателей качества всегда можно говорить о наличии оптимизационного эффекта при хорошей настройке управляющего параметра в оценках и случайных хорошо ориентированных сетках, причем не слишком многоточечных, что в целом позволяет сделать вывод о работоспособности предлагаемых алгоритмов реализации компенсационных управлений в нейробазисе.

Таблица 1		
$e_n$	$\Delta c$	$j$
49.2 = $e_0$		1
43.1	1	1
15.2	1	5
10.9	1	11
5.7	1	13
4.1	1	37
4.0	0.5	24
3.7	0.5	91
3.3	0.5	121
3.2	0.25	42
3.0	0.0625	123

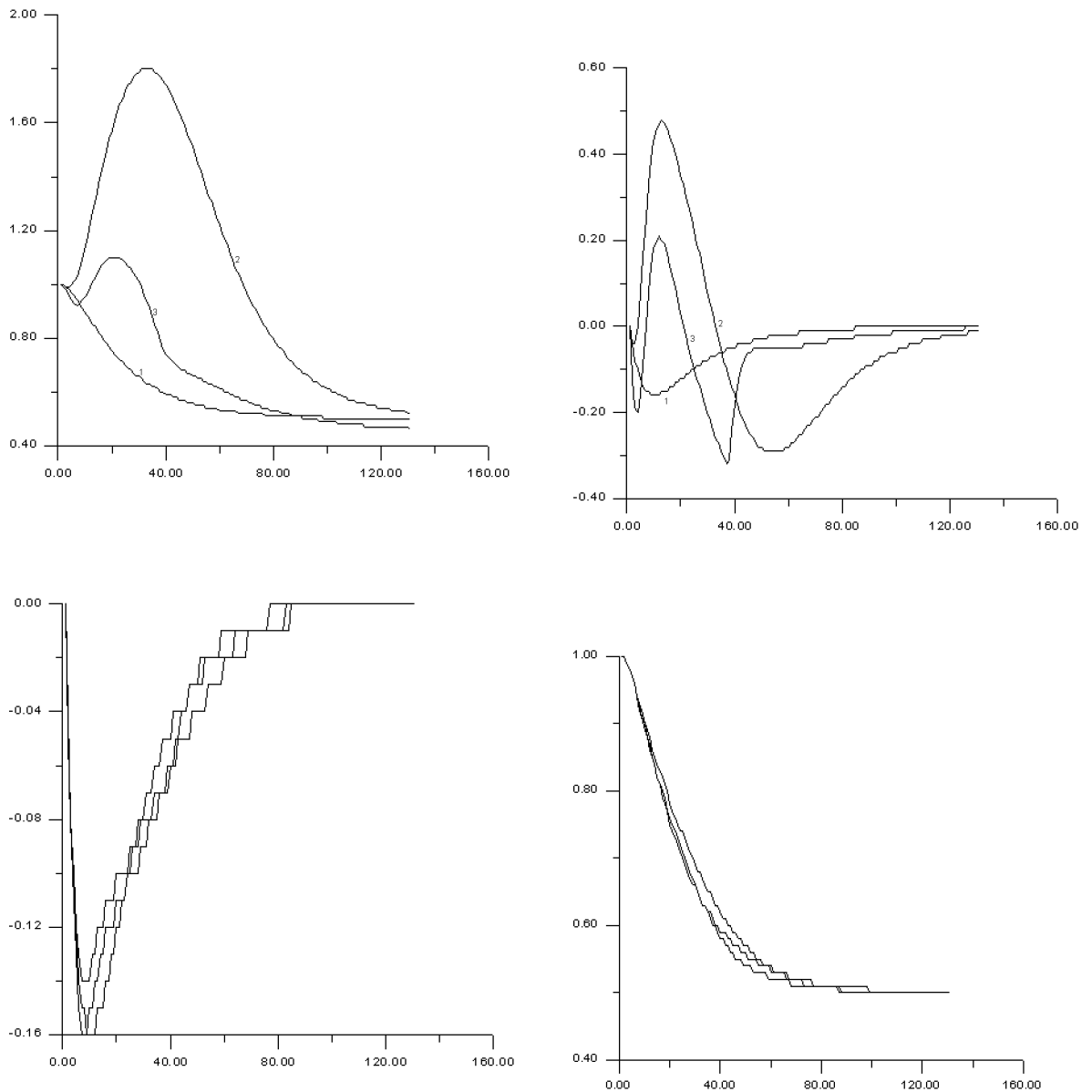


Рис.1. Зависимости от времени для радиуса, радиальной скорости, угловой скорости и угла слева направо соответственно, полученные при идеальном управлении (1), управлении без компенсации (2) и при управлении с оценкой компенсационных слагаемых при минимальном показателе качества (3)

## Список литературы

- [1] Буцев А. В., Первозванский А. А. Локальная аппроксимация с помощью ИНС// Автоматика и телемеханика, 1995, N9, с. 127-136.
- [2] Nguyen, D. H. and B. Widrow Neural Networks for Self-Learning Control Systems// IEEE Control System Magazine, 1990, vol.10, no.3, pp.18-23.
- [3] Катковник В. Я. Непараметрическая идентификация и сглаживание данных: метод локальной аппроксимации. М.: Наука, 1985.
- [4] Бурдаков С. Ф. Динамическая компенсация в задачах управления движением робота по траектории. Деп. в ВИНТИ N 5995-B87. Л.: ЛПИ. 1987. 82 с.
- [5] Первозванский А. А. Курс теории управления. М.: Наука, 1986.