

## **АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗОН БЕЗОПАСНОСТИ МАНИПУЛЯТОРА МР-48**

*А.М. Казанцев, М.В. Носиков*

В статье описаны состав и структура системы управления промышленным робототехническим комплексом, предназначенным для работы в герметичных камерах в условиях сильных радиационных излучений. В связи с превышением рабочей зоны манипулятора робототехнического комплекса над рабочим пространством герметичной камеры и необходимостью остановки или уменьшения скорости движения при достижении зон ограничения предложено использование искусственной нейронной сети на основе перцептрона с сигмоидальной функцией активации, формирующего на выходе сигнал в диапазоне  $[0; 1]$ , используемый как коэффициент передачи сигналов от внешних контуров управления и органов ручного управления манипулятором к внутренним контурам системы управления. Приведен вариант структуры системы управления, представлен способ формирования обучающих выборок нейронной сети и результаты математического моделирования работы системы управления.

Ключевые слова: робот-манипулятор, искусственная нейронная сеть, перцептрон, обучающая выборка, система управления.

В 2015 году филиалом Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе по техническому заданию одного из ведущих предприятий атомной промышленности был спроектирован и изготовлен робототехнический комплекс МР-48. Его основное назначение – исключение ручных операций и введение автоматизированных и автоматических режимов работы

при выполнении технологических операций с материалами в условиях сильных радиационных полей. Манипулятор робототехнического комплекса МР-48 конструктивно представляет собой шестизвенный манипулятор с вращательными степенями свободы в каждом сочленении. Параметры кинематики манипулятора в представлении Денавита-Хартенберга приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры кинематики манипулятора  
в представлении Денавита-Хартенберга

Параметры системы координат звеньев манипулятора					
$i$	Сдвиг $\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	Диапазон
1	$0^\circ$	$90^\circ$	0	0,14 м	$+176^\circ \dots -251^\circ$
2	$90^\circ$	$0^\circ$	0,39 м	0	$\pm 109^\circ$
3	$90^\circ$	$90^\circ$	0,02 м	0	$\pm 95^\circ$
4	$180^\circ$	$90^\circ$	0	0,32 м	$\pm 194^\circ$
5	$180^\circ$	$90^\circ$	0,02 м	0	$\pm 109^\circ$
6	$0^\circ$	$0^\circ$	0	0,35 м	$\pm 360^\circ$

В состав аппаратуры роботизированного комплекса МР-48 входит помимо манипулятора пульт оператора с ЭВМ и органами управления, источники питания, усилительно-преобразующие модули, соединительные кабели. Структурная схема робототехнического комплекса представлена на рис. 1.

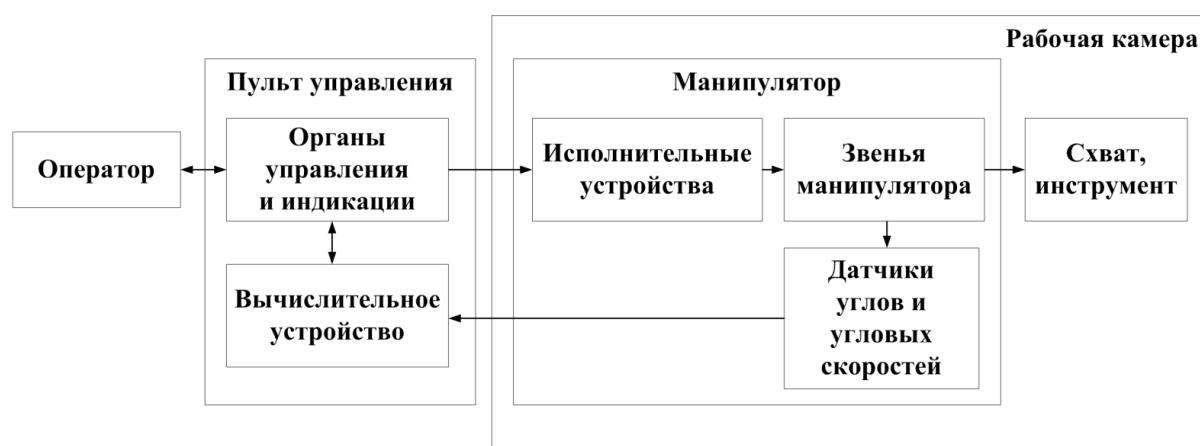


Рис. 1. Структурная схема робототехнического комплекса МР-48

Ядром системы управления (СУ) является ЭВМ пульта оператора, сопряженная с органами управления, датчиками и исполнительными устройствами посредством модулей ввода-вывода, также являющимися аппаратно-программными компонентами системы управления.

Входными и промежуточными сигналами системы управления манипулятора являются:

- воздействия оператора на органы управления  $M_i$ ;
- мгновенные углы поворота (ориентации) звеньев  $q_i$ ;
- мгновенные угловые скорости поворота звеньев  $\omega_i$ ;

Требуемые значения углов и угловых скоростей  $q_{i \text{ уст}}$ ,  $\omega_{i \text{ уст}}$ , формируемые в контурах системы управления.

Выходными сигналами системы управления являются токи  $I_i$  ( $i=1...6$ , т.е. для каждого исполнительного электродвигателя в составе звена), формируемые в каждый момент времени таким образом, чтобы манипулятор осуществлял требуемый характер движения.

В целом система управления является дискретной, с периодом формирования управляющих воздействий 20 мс. В силу специфики объекта управления (манипулятора) и режимов его работы СУ реализована в виде нескольких вложенных контуров управления, реализованных на аппаратном, аппаратно-программном либо программном уровнях.

Функциональная схема системы управления представлена на рис. 2.

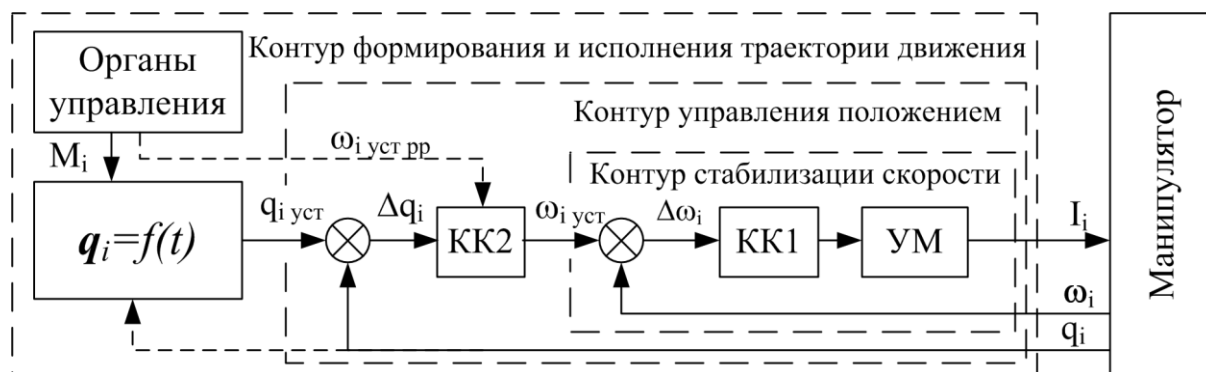


Рис. 2. Функциональная схема системы управления манипулятора

На функциональной схеме обозначены:

КК1 – корректирующий контур (регулятор) стабилизации скорости вращения звеньев манипулятора;

УМ – усилитель мощности, преобразующий широтно-модулированные сигналы управления в выходной ток исполнительных органов манипулятора;

КК2 – корректирующий контур (регулятор) положением звеньев манипулятора;

$q_i$  – мгновенные углы ориентации звеньев манипулятора;

$\omega_i$  – мгновенные угловые скорости поворота звеньев манипулятора;

$I_i$  – токи в исполнительных электродвигателях манипулятора.

Следует отметить, что управление манипулятором осуществляется в одном из трех основных режимов:

– режим ручного управления, при котором оператор с помощью отклонения двух многоосевых джойстиков от нейтрального положения задает уставки скоростей поворота звеньев манипулятора  $\omega_{i \text{ уст пр}}$ , контролируя конфигурацию манипулятора визуально либо по показаниям датчиков углов на пульте управления;

– режим управления в заданной системе координат, при котором оператор с помощью отклонения двух многоосевых джойстиков задает линейную скорость и направление движения точки схвата манипулятора;

– режим формирования и последующего автоматического воспроизведения траектории движения манипулятора. В режиме воспроизведения траектории система управления автоматически формирует новые векторы углов ориентации звеньев в зависимости от времени  $q_{i \text{ уст}} = f(t)$ .

Типовым местом установки манипулятора при его эксплуатации является потолок герметичной защищенной рабочей камеры с вертикальным исходным положением МР-48, при этом, в зависимости от типа рабочей камеры и ее линейных размеров, возможно частичное превышение рабочего пространства манипулятора над рабочей зоной камеры.

В ходе испытаний и опытной эксплуатации манипулятора, проводимых в течение 2016 года на предприятии заказчика, были выявлены случаи касания и ударов схвата манипулятора о стенки и внутренние элементы камеры, что может привести к возможным механическим повреждениям внутрикамерного оборудования и собственно манипулятора. В связи с этим был предложен вариант усовершенствования системы управления путем ввода дополнительного контура контроля нахождения схвата манипулятора в безопасной рабочей области (рис. 3).



Рис. 3. Функциональная схема системы управления с контуром контроля рабочей области

Блок контроля рабочей области на основе информации о параметрах движения манипулятора с использованием классических методов решения прямой кинематической задачи вычисляет линейные координаты схвата

манипулятора и далее сравнивает их с подпространством допустимых либо недопустимых координат (в простейшем варианте – из заранее сформированных массивов допустимых положений), формируя при этом необходимый набор выходных сигналов, используемых для коррекции или полной блокировки движения манипулятора.

В общем случае безопасная рабочая область (БРО) может иметь достаточно сложную конфигурацию и соответственно сложное геометрическое описание. Для составления такого описания зачастую требуются большие временные затраты высококвалифицированного персонала.

Одним из возможных путей решения задачи является применение искусственных нейронных сетей (ИНС) для задания БРО и контроля за выходом схвата манипулятора из нее. Как известно, ИНС обладает хорошими классификационными характеристиками, что можно использовать для выделения БРО из общего объема камеры [2]. Данный способ не требует предварительного геометрического описания БРО, т.к. оно автоматически формируется в процессе обучения (как на этапе начального обучения ИНС, так и в ходе эксплуатации при переобучении). Кроме того, нейросетевой алгоритм обладает высокой численной эффективностью, что немаловажно с учетом его встраивания в контур системы управления.

С целью проверки возможности использования ИНС для контроля выхода за границы БРО проведено компьютерное моделирование системы управления. С учетом того, что имеющееся управляющее программное обеспечение (ПО) разработано в системе NI LabView, для моделирования также использовалась данная среда. Дополнительно использованы программные пакеты расширения среды разработки NI Robotics (моделирование кинематики и динамики движения манипуляторов) и NI Super Simple Neural Networks (работа с ИНС).

В общем виде модель функционирования ИНС описывается выражением:

$$y = F(\sum_{i=1}^n w_i x_i) = F(S) = F(WX^T), \quad (1)$$

где  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  – вектор весовых коэффициентов;

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор входных сигналов;

$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i$  – взвешенная сумма;

$F$  – оператор нелинейного преобразования или функция активации.

Сигмоидальная ИНС (персептрон) с одним скрытым слоем имеет следующую структуру (рис. 4):

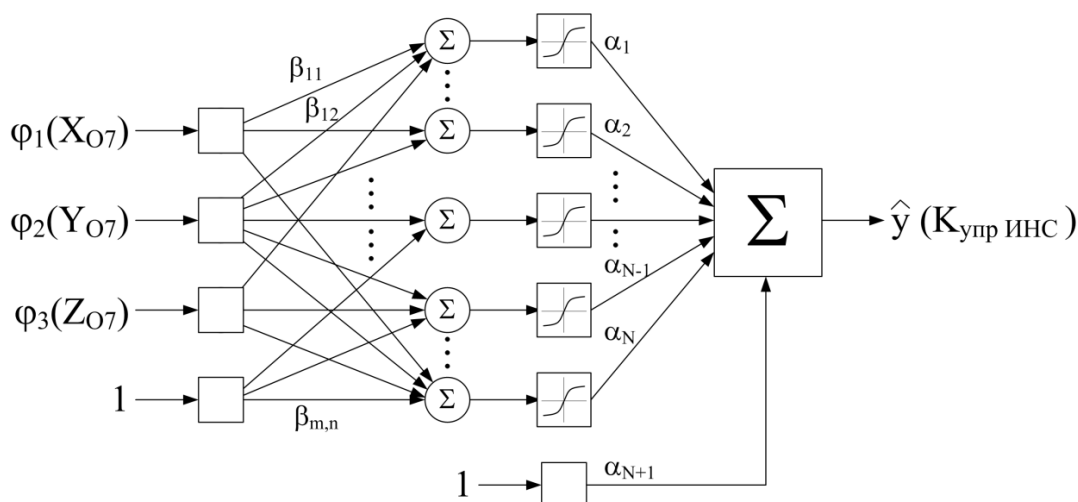


Рис. 4. Структура сигмоидальной ИНС с одним скрытым слоем

Выходное значение ИНС такого типа рассчитывается по формуле:

$$\hat{y}(\varphi, \beta, \alpha) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \tanh\left(\sum_{j=1}^{n+1} \beta_{i,j} \varphi_j\right) + \alpha_{N+1}, \quad (2)$$

где  $N$  – количество нейронов в скрытом слое;

$n$  – количество входных данных (входной слой);

$\varphi = [\varphi_1, \dots, \varphi_n, 1]^T$  – входной слой (исходные данные);

$\beta$  – матрица весовых коэффициентов;

$\alpha$  – вектор весовых коэффициентов выходного слоя;

$\tanh$  – гиперболический тангенс.

В общем случае в персептроне может быть несколько скрытых слоев, в этом случае выход предыдущего слоя  $k$ :

$$\varphi_i^{k+1} = \tanh\left(\sum_{j=1}^{n_{k+1}} \beta_{i,j}^k \varphi_j^k\right) \quad (3)$$

рассматривается как вход скрытого слоя  $k+1$ .

Входной слой ИНС формируется из текущих координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  схвата в базовой системе координат (точка  $O7$  на рис. 2). На выходном слое формируется значение  $K_{упр}$  ИНС в диапазоне  $[0; 1]$ , где  $0$  – выход за границы БРО,  $1$  – нахождение в пределах БРО. На данном этапе разделение областей производится по пороговому значению  $0,5$ . При фиксации выхода за границы БРО коэффициент передачи положений органов управления резко снижается до некоторого минимального значения и оператору подается звуковой сигнал. Таким образом, ИНС выполняет роль контроллера, но полностью не блокирует действия оператора, которому по-прежнему остается доступным весь объем камеры.

В процессе моделирования имитируется движение манипулятора по обучающей траектории, которая по возможности равномерно заполняет БРО. По ходу движения по обучающей траектории с тактом работы системы управления производится накопление массива данных о координатах  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  схвата (рис. 5).

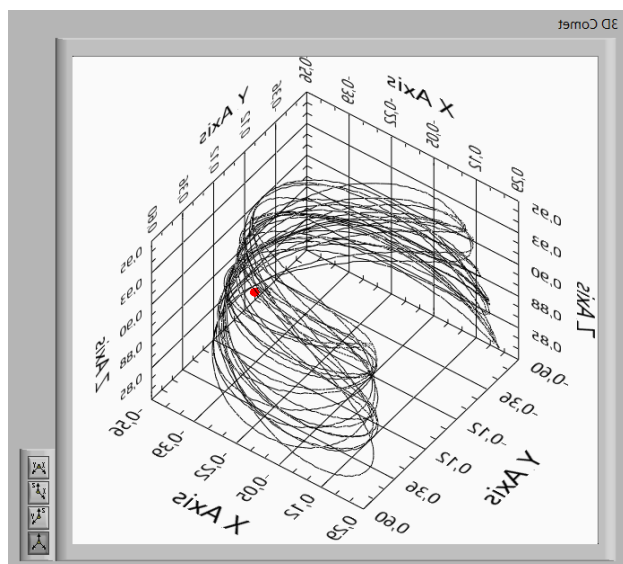


Рис. 5. Обучающая траектория

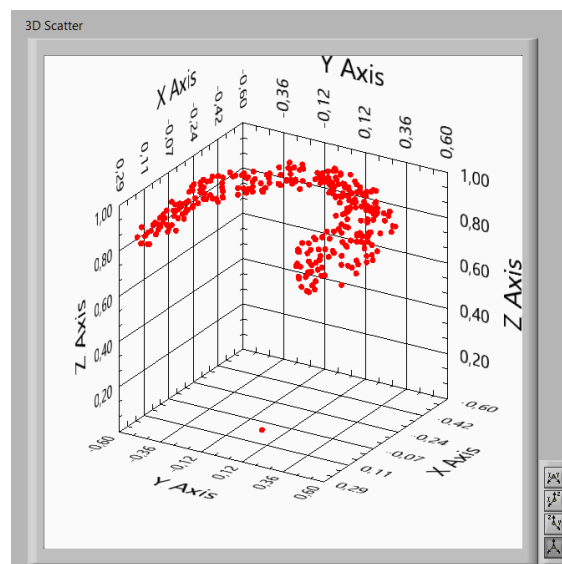


Рис. 6. Обучающий набор

Для формирования обучающего и проверочного набора данных полная рабочая область манипулятора покрывается сетью допустимых точек (в соответствии с его кинематической схемой и возможными углами поворота по осям) по методу Монте-Карло. Точкам, входящим в зону  $\epsilon$  – трубки вокруг обучающей траектории, присписывается выходное значение 1 ( $\epsilon$  подбирается с таким расчетом, чтобы полностью «заполнить» БРО). К обучающему набору присоединяются также все точки обучающей траектории с выходным сигналом 1. Всем оставшимся точкам обучающего и проверочного набора присписывается выходное значение 0. Подмножество обучающего набора с выходом, равным 1 для объема набора 10000 точек и  $\epsilon=0,05$ , представлено на рис. 6.

Стандартным этапом работы с ИНС является этап обучения, в ходе которого ИНС настраивает матрицы весовых коэффициентов и другие внутренние переменные в соответствии с обучающим набором данных (известными векторами входных и выходных сигналов). Полный проход ИНС по всем векторам входных сигналов называется эпохой обучения. Цель обучения ИНС – последующее адекватное формирование выходного сигнала при эксплуатации ИНС с минимальным его отклонением от требуемого значения при любых возможных векторах входных сигналов. В пакете NI Super Simple Neural Networks настройка процесса обучения и этапы обучения представлены в виде диалогового окна в удобном для пользователя виде (рис. 7).

Обучение ИНС проводится путем минимизации среднеквадратической ошибки выхода методом градиентного спуска (алгоритм Левенберга – Марквардта) [3].

На рис. 8 приведено визуальное представление проверочного набора данных, на котором выполнялась верификация работы ИНС.

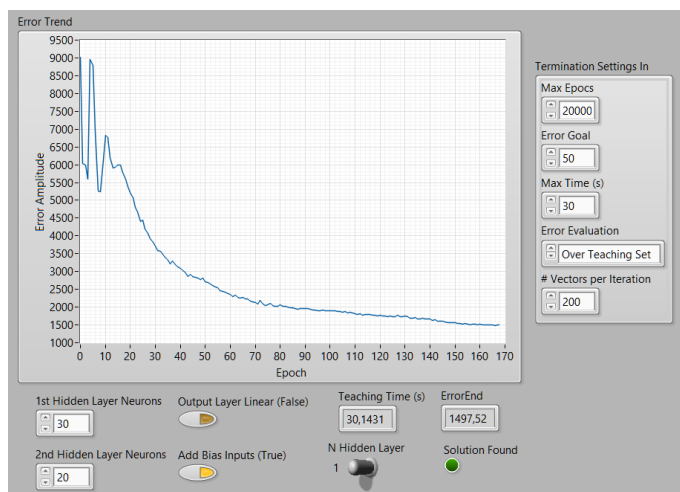


Рис. 7. Процесс обучения ИНС в пакете  
NI Super Simple Neural Networks

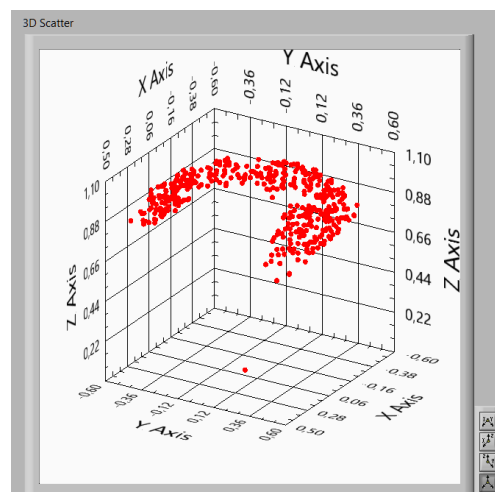


Рис. 8 Проверочный набор  
для верификации ИНС

**Заключение.** Проведенное моделирование СУ с контуром контроля положения схвата манипулятора подтверждает принципиальную пригодность использования ИНС для детектирования БРО достаточно сложной формы, для чего можно использовать однослойный либо двухслойный перцептрон с 20–30 нейронами.

Аналогичным образом может быть реализована многоконтурная ИНС для контроля за положением промежуточных точек манипулятора (например, локтя) с логическим объединением выходов независимых контуров контроля.

В целом по результатам математического моделирования принято решение о внедрении ИНС в рабочий образец робототехнического комплекса МР-48.

#### Библиографический список

1. Юревич, Е.И. Основы робототехники / Е.И. Юревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
2. Назаров, А.В. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем / А.В. Назаров, А.И. Лоскутов. – СПб.: «Наука и техника», 2003. – 384 с.
3. I.M. Mujtaba, Mehboob A. Hussain. Application of Neural Networks and Other Learning Technologies in Process Engineering, Imperial College Press, 2001. – 405 p.
4. Yurevich E.I. Osnovy robototekhniki [Robotics basics]. – Saint-Petersburg: BHV-Petersburg, 2005. – 416 p.
5. Nazrov A.V., Loskutov A.I. Neurosetevye algoritmy prognoirovaniya i optimizatsii sistem [Artificial neural network algorithms for system prediction and optimization]. – Saint-Petersburg: Science and Technics, 2003. – 384 p.

[К содержанию](#)