

Математическая модель искусственной нейронной сети для управления робототехническим комплексом в экстремальных условиях

Е.Г. Царькова

Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний», НИЦ-1, Москва

Аннотация: В работе исследуется математическая модель искусственной нейронной сети с запаздыванием в аргументах функций состояния и управления, предназначенной для управления робототехническим комплексом при проведении аварийно-спасательных операций в экстремальных условиях. Процесс обучения рассматриваемой искусственной нейронной сети описан задачей оптимального управления с запаздыванием. С использованием принципа максимума Понтрягина и метода быстрого автоматического дифференцирования разработан метод решения полученной задачи оптимального управления. Приведены результаты работы программного средства, при создании которого использован алгоритм построения приближенного оптимального управления рассматриваемой задачи.

Ключевые слова: аварийно-спасательные работы, искусственная нейронная сеть, нейроуправление, робототехника, принцип максимума, безопасность.

Сегодня успехи в развитии отечественной робототехники обеспечивают возможность использования робототехнических комплексов (РК) в проведении аварийно-спасательных работ и в пожаротушении. Разработка и внедрение в практическую деятельность спасательных служб автоматизированных комплексов, позволяющих снизить риск гибели людей при проведении спасательных мероприятий в экстремальных условиях, является перспективным направлением современных научных исследований. Актуальность разработки таких систем, в том числе, продиктована растущим уровнем террористических угроз, реализация которых на крупных производственных, химически и радиационно опасных объектах может приводить к техногенным авариям и катастрофам с непредсказуемыми последствиями. В связи с этим целесообразна разработка моделей и алгоритмов управления робототехническими системами, предназначенными для использования спасательными службами при ликвидации чрезвычайных ситуаций на важных объектах. К таким объектам может быть отнесен ряд

производственных и иных объектов уголовно-исполнительной системы Российской Федерации, характеризующихся большим скоплением людей и существованием высокого уровня криминогенных угроз.

Для разработки роботизированных комплексов эффективно применение искусственных нейронных сетей (ИНС). В работе рассматривается построение нейросетевой модели управления роботизированным спасательным комплексом, предназначенным для проведения аварийно-спасательных работ в экстремальных условиях.

За последние десятилетия искусственные нейронные сети активно внедряются в различные сферы деятельности человека, в том числе, для создания робототехнических систем и транспортных средств с автоматическим управлением. Так, в [1] приводится пример применения ИНС при создании адаптивного нейроконтроллера со свойствами ПИД-регулятора; согласно [2] ИНС могут быть использованы при прогнозировании состояния инженерно-технических средств охраны и в транспортных системах; в [3] отмечается целесообразность применения ИНС в организации систем физической защиты объектов особой важности; в [4] рассматривается возможность применения нейросетевого подхода к оценке надежности локальных компьютерных сетей. Подобные технические комплексы находят широкие перспективы применения в разработке систем поддержки принятия решений при работе в экстремальных условиях [5]. При этом наиболее перспективными для применения в сложных технических системах являются динамические нейронные сети, обладающие способностью, в отличие от статических ИНС, адаптировать свою структуру и параметры к входным данным за счет процесса обучения. Данное свойство ИНС обеспечивают преимущество их применения в сравнении со статическими моделями. В моделировании процессов управления сложными техническими системами необходим учет запаздываний [3]. Данный факт

приводит к необходимости рассмотрения ИНС с нетривиальной архитектурой. Согласно предлагаемому подходу для обучения таких нейронных сетей требуется осуществить поиск решения задачи оптимального управления (ЗОУ) с запаздыванием [6]. В исследовании рассматриваются запаздывания в функциях состояния и управления, используемых для построения нейросетевой модели управления робототехническим комплексом с обратной связью, что обеспечивает возможность уточнения модели, а также служит разработке численного алгоритма построения оптимального управления системой. Указанные выше факторы обуславливают новизну, актуальность и практическую значимость исследования.

Рассмотрим математическую модель ИНС, использующуюся для объезда препятствий при управлении передвижением РК, имеющего дифференциальный привод колес. Автоматическое расстояние до препятствия обеспечивает возможность установления соответствующей скорости и направления дальнейшего движения РК, при этом скорости левого и правого привода для передвижения комплекса в необходимом направлении зависят от входных параметров – расположения препятствий и значения коэффициента ускорения. Для описания соответствующей ИНС, содержащей N нейронов, используется нелинейная система дифференциальных уравнений (ДУ) второго порядка с запаздыванием [4]:

$$\ddot{x}_i(t) + \varepsilon(1 - \beta_i x_i^2(t)) + v_i^2 x_i(t) = u_i(t) + \sum_{i=1}^N w_{ij}(t) (\dot{x}_j(t - h_j) - \dot{x}_i(t)), \quad i = 1, \dots, N, t \in [0, T]. \quad (1)$$

С учетом обозначений: $\dot{x}_i(t) = y_i(t)$, $z_j(t) = y_i(t - h_j)$, $i, j = 1, \dots, N, t \in [0, T]$, уравнение (1) переписется в виде системы ДУ первого порядка следующего вида:

$$\dot{x}_i(t) = y_i(t), \quad j = \overline{1, N}, t \in [0, T], \quad (2)$$

$$\dot{y}_i(t) = -v_i^2 x_i(t) - \varepsilon (1 - \beta_i x_i^2(t)) + u_i(t) + \sum_{j=1}^N w_{ij}(t) (y_j(t - h_j) - y_i(t)).$$

Учитываются условия, которым должны удовлетворять функции состояния и управления на начальном отрезке времени:

$$x_i(0) = a_i, \dot{x}_i(t) = \varphi_i(t), i = \overline{1, N}, t \in [-\max\{h_j\}, 0], \quad (3)$$

$$u_i(t) = \psi_i(t), i = \overline{1, N}, t \in [-\max\{h_j\}, 0],$$

где $\varphi_i(t), \psi_i(t)$ – заданные функции.

Вводятся следующие ограничения на управляющие воздействия:

$$|u_i(t)| < B_i, |w_{ij}(t)| < C_{ij}. \quad (4)$$

В введенных соотношениях $x_i(t)$ определяет амплитуду колебаний i -го нейрона в момент времени t ; $y_i(t)$ выражает скорость изменения амплитуды колебаний i -го нейрона; N – количество нейронов сети; T – заданное время протекания процесса; $\varepsilon > 0, \beta$ – коэффициенты, которые характеризуют общее воздействие на i -ый нейрон всего ансамбля нейронов. В модель вводятся весовые коэффициенты $w_{ij}(t)$, $i, j = \overline{1, N}$, а также функции управления $u_i(t), i = \overline{1, N}$, характеризующие величину внешнего воздействия на ансамбль нейронов. Полученная ЗОУ с запаздывающим аргументом принимает следующий вид. Требуется минимизировать функционал:

$$I(u) = M \int_0^T f_0(t, x(t), u(t), w(t)) dt + M_3 \Phi(x(T)) \rightarrow \inf \quad (5)$$

при заданных ограничениях (2) – (4). Здесь константы M, M_3 играют роль весовых коэффициентов. Необходимо осуществить построение оптимального процесса, минимизирующего функционал (5) при заданных ограничениях

(2) – (4). Пусть $f_0(t, x(t), u(t), w(t)) = M_1 \sum_{i=1}^N u_i^2(t) + M_2 \sum_{i,j=1}^N w_{ij}^2(t)$, $\Phi(x(T)) = \sum_{i=1}^N (x_i(T) - A_i)^2$.

Целевой функционал принимает следующий вид:

$$I(u) = \int_0^T \left(M_1 \sum_{i=1}^N u_i^2(t) + M_2 \sum_{i,j=1}^N w_{ij}^2(t) \right) dt + M_3 \sum_{i=1}^N (x_i(T) - A_i)^2 \rightarrow \inf. \quad (6)$$

Для полученной задачи минимизации рассматриваемого функционала применяются необходимые условия оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина [7, 8]. Функция Понтрягина для рассматриваемой задачи примет следующий вид:

$$H(\lambda_0, x, y, z, p(t), q(t), u, w) = -\lambda_0 M_1 \sum_{i=1}^N u_i^2(t) - \lambda_0 M_2 \sum_{i,j=1}^N w_{ij}^2(t) + \sum_{i=1}^N p_i(t) y_i + \\ + \sum_{i=1}^N q_i(t) \left(-(v_i)^2 x_i - \varepsilon (1 - \beta_i x_i^2) + u_i + \sum_{j=1}^N w_{ij} (z_j - y_i) \right).$$

Здесь $z_j(t) = y_i(t - h_j)$, $i, j = 1, \dots, N$, $t \in [0, T]$, введенные функции $p(t)$, $q(t)$ являются сопряженными функциями, удовлетворяющими системе ДУ с опережающим аргументом. При этом условие максимума примет вид:

$$-\lambda_0 \left(M_1 \sum_{i,j=1}^N u_i^2(t) + M_2 \sum_{i,j=1}^N w_{ij}^2(t) \right) + \sum_{i=1}^N p_i(t) y_i + \\ + \sum_{i=1}^N q_i(t) \left(-v_i^2 x_i - \varepsilon (1 - \beta_i x_i^2) + u_i + \sum_{j=1}^N w_{ij} (z_j - y_i) \right) = \\ = \sum_{i=1}^N p_i(t) \bar{y}_i + \sum_{i=1}^N q_i(t) \left(-v_i^2 \bar{x}_i - \varepsilon (1 - \beta_i \bar{x}_i^2) \right) + \max_{u \in U} \left[-\lambda_0 M_1 \sum_i u_i^2(t) + \sum_{i,j=1}^N q_i(t) u_i \right] + \\ + \max_{w \in W} \left[-\lambda_0 M_2 \sum_i w_{ij}^2(t) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (q_i(t) w_{ij} (\bar{z}_j - \bar{y}_i)) \right].$$

Для построения приближенного численного решения строим дискретную ЗОУ (ДЗОУ) с использованием равномерного разбиения интервала $[0, T]$ q точками. Для аппроксимации интеграла применяем правило левых прямоугольников, систему ДУ аппроксимируем по схеме Эйлера. Получаем ДЗОУ следующего вида:

$$I(u, w) = \left(M_1 \sum_{i=1}^N (u^i)^2 + M_2 \sum_{i,j=1}^N (w^{ij})^2 \right) \Delta t + M_2 \Phi(x^q) \rightarrow \inf, \quad (7)$$

$$x_i^{l+1} = x_i^l + \Delta t y_i^l, i = \overline{1, N}, l = \overline{1, q}, \quad (8)$$

$$y_i^{l+1} = y_i^l + \Delta t \left(-(v_i^l)^2 x_i^l - \varepsilon \left(1 - \beta_i (x_i^l)^2 \right) + u_i^l + \sum_{j=1}^N w_{ij}^l (y_j^{l-\tau_j} - y_i^l) \right), \quad (9)$$

$$x_i^0 = a_i, \quad y_i^l = \varphi_i^l, \quad l \in [-\max\{v_j\}, 0], \quad |u_i^l| < B_i. \quad (10)$$

В соотношениях (7) - (10) индекс $i = \overline{1, N}$ обозначает номер координаты вектора, индекс $l = \overline{1, q}$ определяет номер нейронного слоя. Для решения ДЗОУ используем метод быстрого автоматического дифференцирования (БАД) [1, 7, 9]. Для реализации реализующего метод градиентного спуска вычислительного алгоритма, построенного с учетом полученных соотношений и метода БАД, автором разработано программное средство в среде IDE Lazarus. Схема алгоритма приведена на рис. 1.

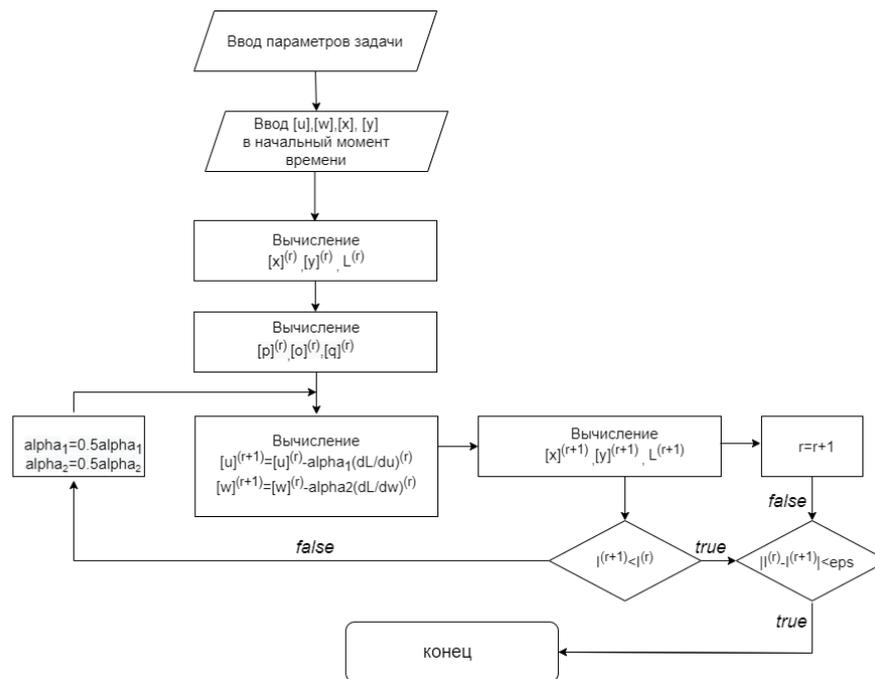


Рис. 1. – Схема вычислительного алгоритма

При заданных значениях штрафных коэффициентов M_1, M_2, M_3 и параметров задачи программой выполнено 13946 итераций. Полученные результаты приведены на рис. 2 – 4.

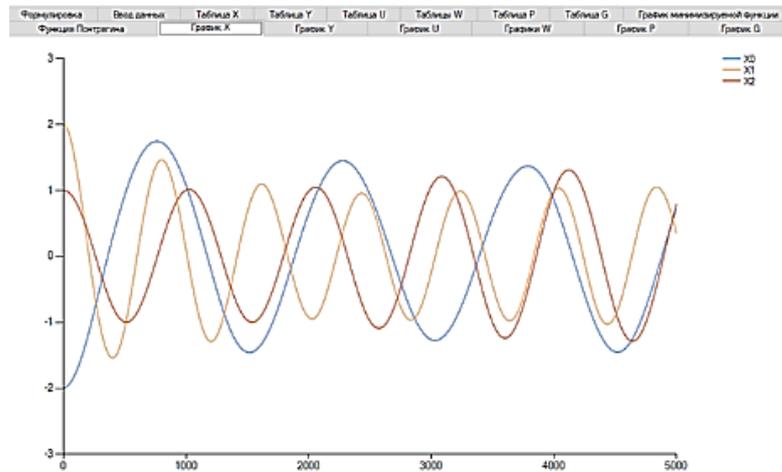


Рис. 2. – Графики функций состояния

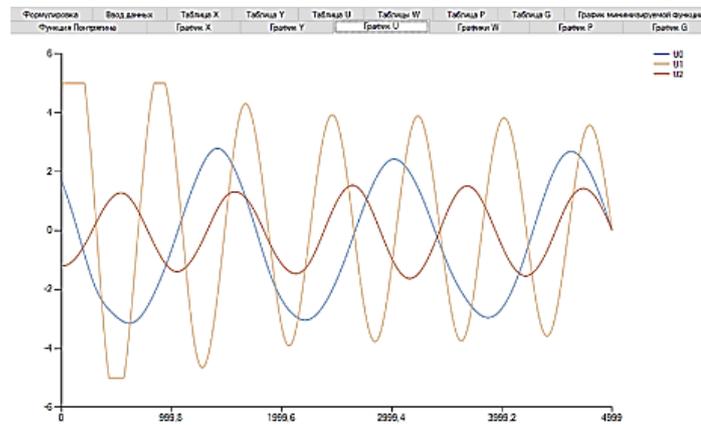


Рис. 3. – Графики управляющих воздействий

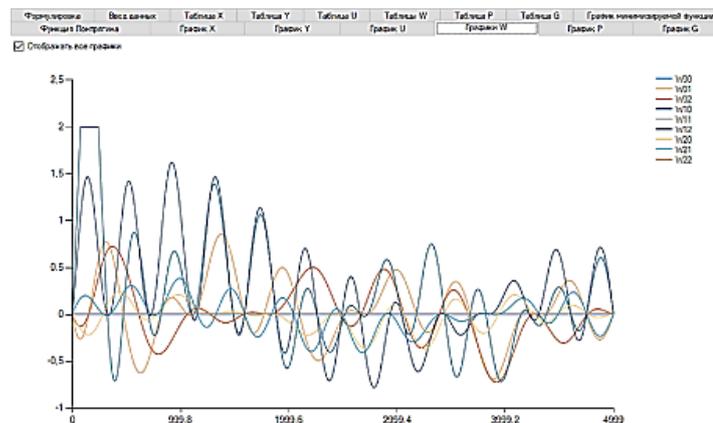


Рис. 4. – Графики значений весовых коэффициентов

На рис. 2 приведены графики трех нейронов, участвующих в построении модели $(x_0(t), x_1(t), x_2(t))$. Графики, представленные на рис. 3, отражают изменение функций управления $u_0(t), u_1(t), u_2(t)$. На рис. 4 приведены графики управлений $w_{ij}(t), i = \overline{0, 2}, j = \overline{0, 2}$. Критерием останова в работе алгоритма служит достижение допустимой величины ошибки обучения $e_i = 0,08$ либо выполнение максимально допустимого количества выполненных итераций $It_{\max} = 15000$. Ключевой особенностью разработанного алгоритма является возможность его применения для моделирования ИНС, динамика которых описывается системой ДУ с запаздываниями.

Обозначим через X_p, Y_p координаты РТК, через V_{BR}, V_{BL} линейные скорости, соответствующие левому и правому приводу, полученные с использованием обученной ИНС. Пусть далее L, θ обозначают ширину и угол поворота, выполняемого РТК, $[X_0, Y_0]$ – координаты начального положения РТК. Тогда координаты РТК в каждый момент времени заданного временного интервала могут быть вычислены с учетом системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{X}_p(t) &= \left(\frac{V_{BR} + V_{BL}}{2} \right) \sin \theta + X_0, \\ \dot{Y}_p(t) &= \left(\frac{V_{BR} + V_{BL}}{2} \right) \cos \theta + Y_0, \quad t \in [0, T]. \end{aligned} \quad (11)$$

Построенная математическая модель ИНС может быть использована для создания автопилотируемых РТК, предназначенных для проведения аварийно-спасательных работ в экстремальных условиях. В силу гибкости, устойчивости и возможности адаптации к внешним условиям ИНС позволяют решать задачи управления сложными техническими системами в широком диапазоне параметров [10].

Литература

1. Шанин Д.А., Чикин В.В. Нейросетевой адаптивный контроллер для задачи управления объектом с неизвестной структурой посредством глобальной обратной связи // Инженерный вестник Дона, 2008, № 2.
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/60.
2. Душкин А.В., Цветков В.В. Вопросы моделирования состояний инженерно-технических средств охраны и надзора // Вестник Воронежского института ФСИН России, 2014, №3, с. 28-31.
3. Сумин В.И., Чураков Д.Ю., Царькова Е.Г. Разработка моделей и алгоритмов информационных структур и процессов объектов особой важности // Промышленные АСУ и контроллеры, 2019, № 4. С. 30-39.
4. Каяшев А.И., Рахман П.А., Шарипов М.И. Анализ показателей надежности локальных компьютерных сетей // Вестник УГАТУ. 2013. №5, с. 140-149.
5. Омельченко В.В. Информационное обеспечение системы государственного управления национальными ресурсами: риск-ориентированный подход // Правовая информатика, 2019, № 1. С. 4-17.
6. Tsarkova E., Belyaev A., Lagutin Y., Matveev Y., Andreeva E. Technical Diagnostics of Equipment Using Data Mining Technologies // Safety in Aviation and Space Technologies: Select Proceedings of the 9th World Congress «Aviation in the XXI Century». Cham: Springer, 2022. Pp. 345-356. URL: link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9_30.
7. Игнатьева О.В. Архитектурные приемы при разработке программного обеспечения, зависящего от интерфейса пользователя // Инженерный вестник Дона, 2022, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7478.



8. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 55 с.
9. Dushkin A.V., Kasatkina T.I., Novoseltsev V.I., Ivanov S.V. An improved method for predicting the evolution of the characteristic parameters of an information system // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 973, № 1, 2018. P. 012031. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/973/1/012031/pdf.
10. Dubrovin A.S., Ogorodnikova O.V., Tsarkova E.G., Andreeva E.A., Kulikova T.N. Analysis and visualization in graph database management systems // Journal of Physics: Conference Series: Current Problems. Voronezh, V.1902, № 1, 2021. P. 012059. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1902/1/012059.

References

1. SHanin D.A., CHikin V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2008, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2008/60.
 2. Dushkin A.V., Cvetkov V.V. Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii, 2014, №3, pp.28-31.
 3. Sumin V.I., CHurakov D.YU., Car'kova E.G. Promyshlennye ASU i kontrollery, 2019, № 4. pp. 30-39.
 4. Kayashev A. I., Rahman P. A., SHaripov M. I. Vestnik UGATU, 2013, №5, pp. 140-149.
 5. Omel'chenko V.V. Pravovaya informatika, 2019, № 1. pp. 4-17. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_86_Akolzin.pdf_2394.pdf.
 6. Tsarkova E., Belyaev A., Lagutin Y., Matveev Y., Andreeva E. Safety in Aviation and Space Technologies: Select Proceedings of the 9th World Congress «Aviation in the XXI Century». Cham: Springer, 2022. pp. 345-356. URL: link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-85057-9_30.
-



7. Ignat'eva O.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7478.
8. Ventcel' E.S. Issledovanie operacij [Operations research]. M.: Sovetskoe radio, 1972. 55 p.
9. Dushkin A.V., Kasatkina T.I., Novoseltsev V.I., Ivanov S.V. Journal of Physics: Conference Series. 2018, P. 012031. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/973/1/012031/pdf.
10. Dubrovin A.S., Ogorodnikova O.V., Tsarkova E.G., Andreeva E.A., Kulikova T.N. Journal of Physics: Conference Series: Current Problems. Voronezh, V.1902, № 1, 2021. P. 012059. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1902/1/012059.