

На правах рукописи

Забихифар Сейедхассан

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ
СИСТЕМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И
СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ**

Специальность: 05.02.05

Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

Ющенко Аркадий Семёнович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Официальные оппоненты:

Мещеряков Роман Валерьевич

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Жданов Александр Аркадьевич

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ОАО Института точной механики и вычислительной техники им. С.А. Лебедева РАН

Ведущая организация:

ГНЦ РФ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»

Защита состоится «11» декабря 2018 года в 16 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, по адресу: 105005, г.Москва, Госпитальный переулок, д.10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу : 105005, г.Москва, ул. 2-я Бауманская , д.5, стр.1, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « » 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н., доцент

И. В. Муратов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

При решении ряда сложных манипуляционных задач целесообразно принимать во внимание нелинейную динамику объекта управления. К таким задачам, в частности, можно отнести управление крупными манипуляторами космического базирования, а также наземными манипуляционными системами, применяемыми в строительстве, при ликвидации последствий аварий и катастроф. Для подобных манипуляционных систем задача управления усложняется за счет того, что динамики управляемой конструкции весьма сложна и, в большинстве случаев, не может быть полностью математически описана. В связи с этим не всегда могут быть применены методы, основанные на решении обратной задачи динамики. Применение PID- контроллеров, которые широко используются в большинстве промышленных приложений, также не позволяет принять во внимание особенности динамики движения таких систем. Также возникают проблемы с обеспечением устойчивости, в том числе, при действии внешних факторов, которые заранее не известны.

Новое направление в данной области связано с применением нейронных сетей, которые способны оценить динамику системы в режиме реального времени. С другой стороны, применение скользящих режимов в системах управления обеспечивает независимость процесса управления, как от внешних воздействий, так и от параметрических возмущений. Объединение этих методов позволяет создать систему, которая может устраниить некоторые недостатки каждого метода.

В данной диссертации разработан метод управления, основан на адаптивном алгоритме настройки нейронной сети. Предлагаемый метод позволяет управлять системой без априорной информации о структуре и параметрах динамической модели управляемого объекта. Для определения коэффициентов нейросетевого регулятора применяются адаптивные алгоритмы, позволяющие проводить его настройку в режиме нормального функционирования системы. С помощью метода Ляпунова получены условия устойчивости такой системы управления. Эффективность предложенного способа управления, подтверждается результатами моделирования системы управления в среде MATLAB, а также экспериментальными исследованиями робототехнических систем.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является разработка интеллектуальной системы управления с использованием адаптивной искусственной

нейронной сети для широкого класса роботов. Для манипуляционных систем управление усложняется за счет сложной и нелинейной динамики конструкции, которая, может быть не полностью описана. Преимущество применения адаптивной нейронной сети для таких задач состоит в том, что правила управления не зависят от математической модели объекта. Другим преимуществом такого способа управления является возможность управления не полностью активированными системами (underactuated systems), в которых число активных элементов меньше числа степеней подвижности . Для достижения поставленной цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

- Разработан алгоритм управления на базе адаптивной нейронной сети для управления роботами различного типа.
- Проведено моделирование робототехнических систем с целью обоснования предложенного способа управления
- Разработан способ управления не полностью активированными робототехническими системами
- Разработан алгоритм гибридного управления положением и силами, развиваемыми манипулятором в процессе выполнения рабочей операции.
- Выполнены экспериментальные исследования реальных робототехнических систем, показавшие эффективность предложенных методов.

Методы исследования

При выполнении работы были использованы методы теории искусственных нейронных сетей, адаптивного управления, теории автоматического управления и системного анализа.

Научная новизна работы

заключается в следующем:

1. Разработан метод управления сложным динамическим объектом с использованием адаптивной нейронной сети и скользящих режимов. Система адаптивного управления позволяет эффективно управлять РТС без априорного знания математической модели динамики объекта управления, а также обеспечивает инвариантность процесса управления по отношению к внешним воздействиям.
2. Предложенная система обладает свойством он-лайн обучения в процессе работы системы и не требует априорной информации о математической модели объекта управления
3. Показано, что предлагаемый метод может быть использован как для управления манипуляционными роботами, так и для управления

другими типами робототехнических систем, включая механические системы с не полностью активированными степенями подвижности, манипуляторы с управлением рабочим инструментом как по силе, так и по положению, БПЛА

4. Предложен подход компенсации высокочастотных колебаний управляющего сигнала в окрестности поверхности скольжения, основанный на применении двойной нейронной сети. В том числе, предложена новая функция активации, позволяющая повысить эффективность управления

Практическая ценность работы

состоит в том, что предложенный способ управления позволяет эффективно управлять сложными механическими системами, динамика которых описана не полностью. В том числе, при наличии переменных нагрузок и возмущений, неизвестных заранее. Метод позволяет также реализовать интегрированную систему управления манипуляционными роботами как по положению, так и по усилиям.

На защиту выносятся

1. Метод управления с использованием адаптивной нейронной сети
2. Математическая модель манипуляционного робота, управляемого с применением адаптивной нейронной сети.
3. Гибридное управление манипулятором по силе и по положению
4. Результаты моделирования робототехнических систем и результаты экспериментальных исследований.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и получили положительную оценку на ряде научно-технических конференций, в том числе:

На Международных научно-технических конференциях «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018).

Научных конференциях Иранских студентов, молодых ученых и аспирантов. (Москва 2015, Екатеринбург 2017)

Принят доклад на международной конференции: The 3rd International Conference on interactive collaborative robotics, ICR September, 2018). (Leipzig - Germany)

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 8-ти публикациях, в том числе, в 4-х научных статьях, опубликованных в журналах из перечня ВАК РФ.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы.

Работа составляет 143 печатных страницы, 77 рисунков, 4 таблицы. Список использованной литературы включает 95 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, изложена краткая структура диссертации, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены нпучные работы, которые были ранее сделаны в этой области, и составлен критический обзор развития нелинейных методов в области управления роботами и нелинейных систем. В первую очередь, тех методов, в которых для управления техническими объектами применялись искусственные нейронные сети и скользящие режимы. Отмечено, что в рассмотренных работах остаются нерешенными следующие вопросы:

- Необходимость устранения высокочастотных колебаний, обусловленных скользящим режимом (chatter –«чаттер»), особенно при действии возмущений.
- Отсутствие блока, обеспечивающего интегрированное управление для всех приводов многоканальной системы управления, в которой применяются нейронные сети и скользящие режимы.
- Сохраняется проблема обучения нейронной сети для управления роботами различного типа в процессе нормального функционирования системы управления..

Вторая глава посвящена разработке способов управления робототехнических систем с применением адаптивной нейронной сети и скользящих режимов (Adaptive Neural Network Sliding Controller – ANNSC). Способ адаптивного нейронного сетевого управления разработан в общем случае для систем типа МИМО. Была введена новая функция активации для повышения эффективности управления. Предложенная схема управления была исследована и оптимизирована для манипуляционного робота типа SCARA. Предложен новый алгоритм двойной искусственной нейронной сети типа ANNSC с новой функцией активации, позволяющий устраниить дребезг («чаттер») и улучшить процесс управления рабочим инструментом манипулятора по положению без использования предварительной информации о параметрах робота.

Уравнения динамики робота-манипулятора с жесткими связями могут быть записаны как

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = \tau \quad (1)$$

где $M(q)$ - матрица инерции, $V_m(q, \dot{q})$ - матрица кориолисовых / центростремительных сил, $F(\dot{q})$ - силы трения, $G(q)$ - вектор сил тяжести, а $\tau_d(t)$ представляет собой внешние возмущения. Управляющий входной вектор $\tau(t)$ содержит компоненты в форме крутящих моментов для вращательных соединений и сил для призматических соединений. Чтобы робот-манипулятор следовал заданной траектории, соответствующей обобщенным координатам $q_d(t)$, погрешность положения $e(t)$ и ошибки отслеживания заданной траектории $s(t)$ могут быть определены как:

$$\begin{aligned} e(t) &= q_d(t) - q(t) \\ s &= \dot{e} + \lambda(t)e \end{aligned} \quad (2)$$

где λ -положительно определенная матрица параметров. Из (2), следует, что сходимость s к нулю подразумевает сходимость ошибки отслеживания и ее производной к нулю. Уравнения динамики робота по отношению к ошибке s на выходе фильтра имеют следующий вид:

$$Ms = -V_m s + f(x) + \tau_d - \tau \quad (3)$$

где неизвестная нелинейная функция $f(x)$ определяется как:

$$f(x) = M(q)(\ddot{q}_d + \lambda\dot{e}) + V_m(q, \dot{q})(\dot{q}_d + \lambda e) + G(q) + F(\dot{q}) \quad (4)$$

В соответствии с универсальной аппроксимационной теоремой, нейронные сети (НС) типа SHL (Single Hidden Layer) могут аппроксимировать нелинейные, непрерывные функции. Согласно этому свойству существует двухслойная НС, аппроксимирующая функцию $f(x)$, т.е. такая, что эта функция может быть представлена в виде:

$$f(x) = W^T \sigma(V^T x) + \varepsilon \quad (5)$$

где матрицы v, w являются оценками матриц весовых коэффициентов, x является входным вектором нейронной сети, σ является сигмоидной активационной функцией а погрешность аппроксимации ε ограничена на компакте $\|\varepsilon\| < \varepsilon_N$.

В рассматриваемом случае текущее значение управляющего сигнала выберем как

$$\tau = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) + k_v s + v \quad (6)$$

где \hat{v}, \hat{w} являются матрицами входных и выходных весов нейронной сети соответственно, которые должны быть определены с помощью процедур настройки. Заметим, что \hat{v}, \hat{w} являются оценками идеальных значений весовых матриц. Компоненты вектора x : $x_i = [e_i, \dot{e}_i, \theta_{id}, \dot{\theta}_{id}, \ddot{\theta}_{id}]$ является входным

вектором каждого нейрона, $e_i = \theta_{id} - \theta_i, i=1,2,\dots,n$; k_v, k_s являются константами и $v = -k_s \text{sat}(r/\varphi)$ представляет собой функцию, которая обеспечивает устойчивость. Структурная схема системы управления показана на Рис. 1.

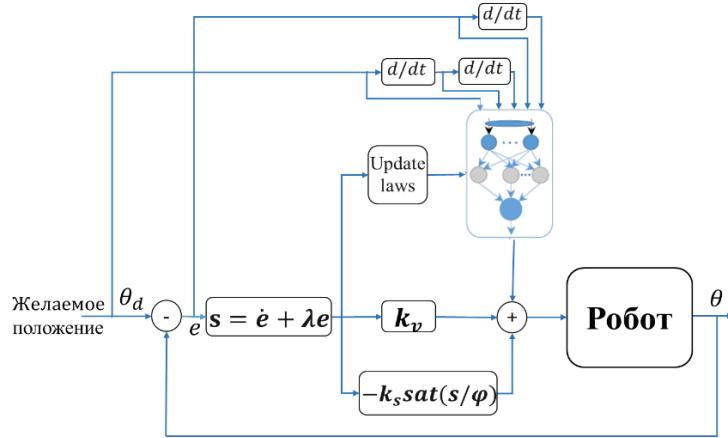


Рис. 1. Структура системы управления роботом с помощью нейронной сети

Настройка веса нейронной сети обеспечивается путем решения дифференциальных уравнений относительно весовых коэффициентов

$$\begin{aligned}\dot{\hat{W}} &= F_w(\hat{\sigma} s^T - k \|s\| \hat{W}) \\ \dot{\hat{V}} &= F_v(x s^T \hat{W}^T \hat{\sigma}' - k \|s\| \hat{V})\end{aligned}\quad (7)$$

с любыми постоянными положительно определенными матрицами F_w, F_v , здесь k - положительная константа. С помощью метода Ляпунова показано, что ошибка отслеживания траектории $s(t)$ стремится к нулю с течением времени, а матрицы оценок весовых коэффициентов \hat{v}, \hat{w} ограничены. Таким образом, при выборе закона управления (6) и законов адаптации (7), замкнутая система управления устойчива при отработке заданной траектории движения робота-манипулятора по положению.

Поскольку сигмоидальная функция при отрицательных данных сходится к нулю, была предложена новая функция активации с учетом отрицательных значений данных. Диаграмма предлагаемой функции активации показана на Рис. 2, и ее уравнение имеет вид:

$$\sigma_{new}(x) = \frac{1}{1 + e^{-|x|}}$$

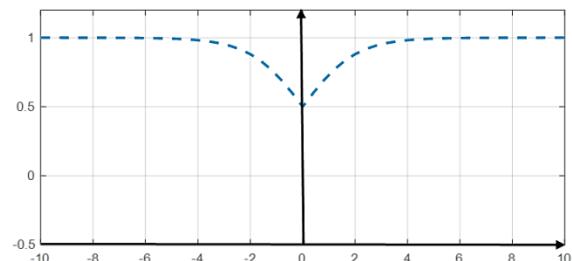


Рис. 2. Новая функция активации

Как показано в экспериментах, эффективность управления может быть значительно увеличена при использовании новой функции активации.

При использованию фильтрованной ошибки отслеживания $s(t)$ (см. выше), высокочастотные колебания («чаттер») могут появиться и в процессе устойчивого движения. Для устранения этого феномена предлагается введение корректирующей нейронной сети с функцией активации $Z(\cdot)$ описываемой как:

$$Z(x) = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{-2x}} \quad (8)$$

Идеальным выражением корректирующего сигнала будет:

$$U_{cor}^* = B^* Z(s^*) \quad (9)$$

В схему управления при этом добавляется вторая нейронная сеть, обеспечивающая получение корректирующего сигнала (Рис. 3).

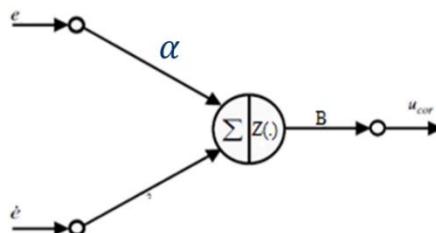


Рис. 3. Вторая сеть для оценки корректирующего термина

Выход этой сети определяется как:

$$U_{cor}^* = BZ(\alpha^T x^e) + \varepsilon_c \quad (10)$$

где коэффициенты B и $\alpha = [\lambda_1 \ \lambda_2]^T$ представляют собой идеальные веса выходного слоя и скрытого слоя соответственно, $x^e = [e_1 \ e_1]^T$ является входным вектором, ε_c является ошибкой оценки корректирующего сигнала, $Z(\cdot)$ - функция активации (8). Реальная оценка корректирующего сигнала нейронной сети, представленной на Рис. 3 имеет следующий вид:

$$U_{cor} = \hat{B}Z(\hat{\alpha}^T x^e) \quad (11)$$

Предлагаемые законы адаптации для корректировки весов определяются следующими уравнениями

$$\dot{\hat{B}} = F_B \hat{Z}(\hat{\alpha}^T x^e) s \quad (12)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = F_\alpha (x^e s \hat{B} \hat{Z}' + k_\alpha |s| (\bar{\alpha} - \hat{\alpha}))$$

где $F_B = F_B^T > 0$, $F_\alpha = F_\alpha^T > 0$, $k_\alpha > 0$.

Вектор $\bar{\alpha}$ выбирается следующим образом:

$$\bar{\alpha} = \begin{bmatrix} p \\ \frac{p}{|e_1| + \varepsilon} \end{bmatrix}^T, \quad p, \varepsilon > 0 \quad (13)$$

Используя закон управления (11), можно представить структуру системы управления с предлагаемым контроллером как показано на Рис. 4.

Экспериментальные исследования предложенного способа управления проводились на роботе- манипуляторе типа SCARA (Рис. 5). Эти исследования включали как математическое моделирование, так и исследование, проведенное на реальном роботе. Математическая модель робота была разработана в пакете Solidworks и импортирована в пакет MATLAB с использованием второго поколения пакета SimMechanics

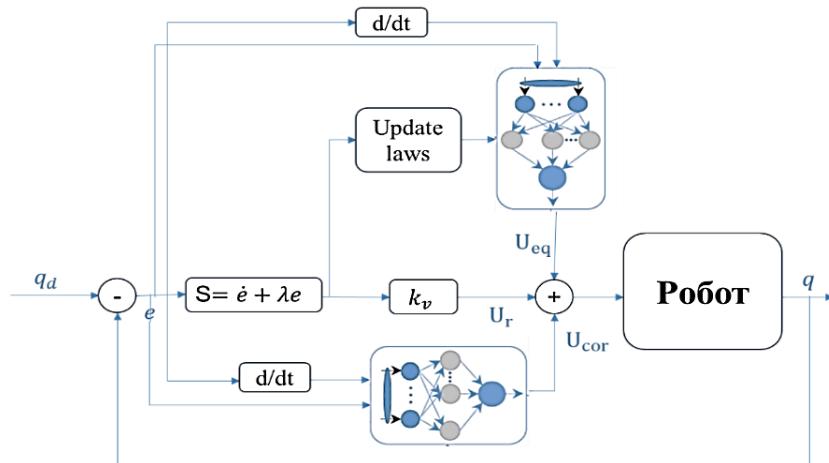


Рис. 4. Структура системы управления

В приведенных на Рис. 5 результатах экспериментов вначале первое звено перемещается, а второе - нет. Показано, что после обучения первого звена обеспечивается отработка внешних возмущений. Затем начинает двигаться второе звено, а первое останавливается. После этого оба звена перемещаются оказывая динамические возмущения друг на друга. Из графиков видно, что возмущения были практически полностью скомпенсированы, и процесс управления роботом получился удовлетворительным.

Вторая проблема, решаемая с помощью НС связана с устранением высокочастотных колебаний (чаттера) в окрестности поверхности скольжения. Чтобы устраниТЬ колебания, был реализован новый подход, при котором вводится двойная нейронная сеть. 1- Представляет интерес сравнить предложенный выше алгоритм ANNSC. 2- тот же подход с новой функцией активации. 3- и с его дополнением двойной нейронной сетью. Три предложенных метода были реализованы и сравнение показало, что третий метод заметно улучшает точность выполнения операции.

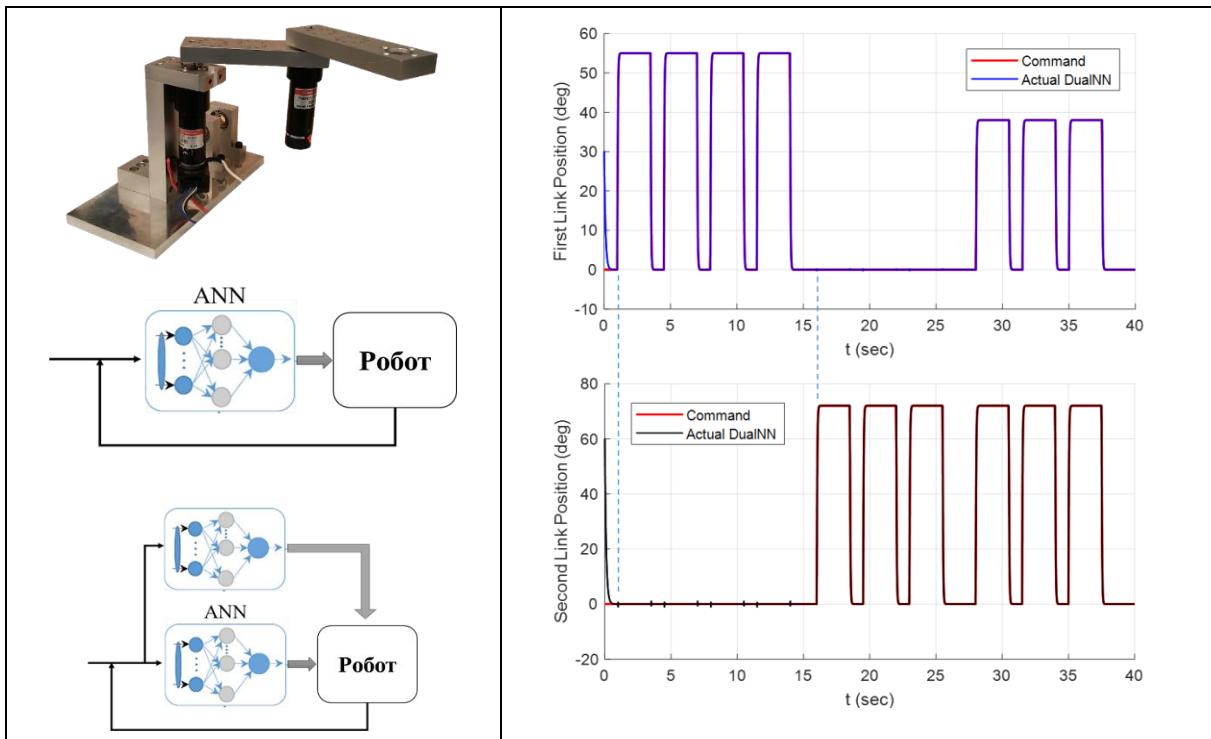


Рис. 5. Результаты моделирования системы с двойной НС

Сравнение ошибок методов приведено на Рис. 6. Как показано на Рис. 7, дисперсия ошибки по положению была уменьшена примерно в три раза для первого и на одну треть для второго методов. С использованием нового предложенного алгоритма, использующего двойную сеть ANN, чаттер также был существенно уменьшен, как показано на Рис. 6.

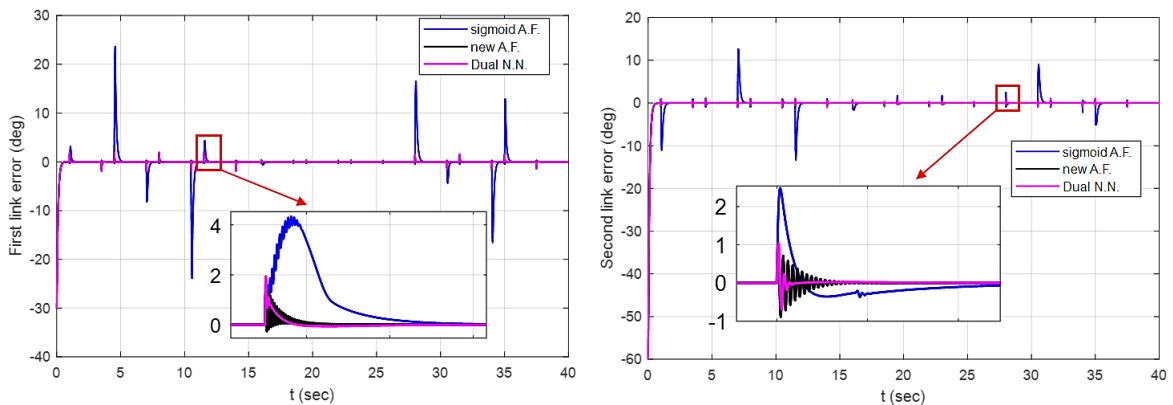


Рис. 6. Сравнение ошибок местоположения трех подходов

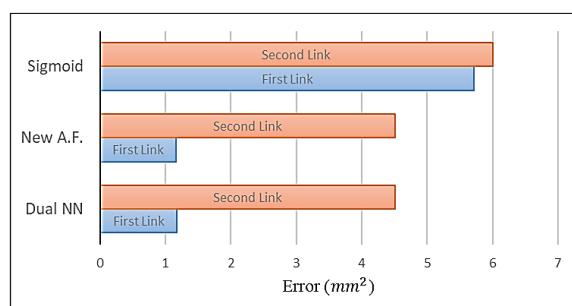


Рис. 7. Дисперсия погрешности

Основное требование к адаптивным нейросетевым регуляторам – гибкое поведение регулятора в условиях неопределенности, действия внешних возмущений и отклонения реальной динамики робота от теоретической. Для проверки этой способности регулятора полезная нагрузка робота была увеличена в процессе его работы. Из графиков на Рис. 8 видно, что это не привело к потере устойчивости системы.

Было проведено сравнение результатов работы предложенного регулятора и оптимизированного ПИД регулятора при изменении полезной нагрузки. Как видно из графиков на Рис. 8, ПИД регулятор не справился с задачей стабилизации, когда второе звено начало двигаться. В то же время, предложенный алгоритм смог хорошо компенсировать динамические возмущения.

Чтобы показать эффективность предложенного способа управления, проводились экспериментальные исследования при управлении положением реального робота SCARA. Экспериментальная установка, элементы которой показаны на Рис. 9, включает в себя два двигателя Maxon с редукторами и энкодерами с двумя алюминиевыми звеньями руки робота.

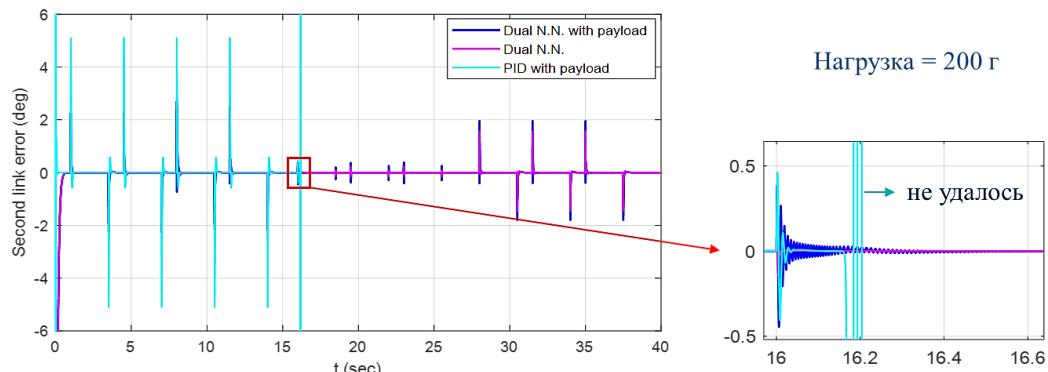


Рис. 8. Сравнение предложенного контроллера с ПИД-регулятором при изменении нагрузки

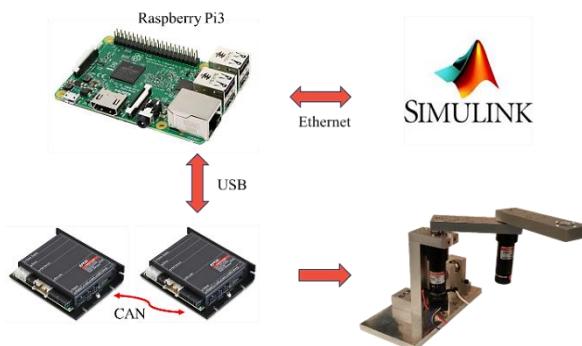


Рис. 9. Экспериментальный стенд для робота SCARA

Система управления которая показана на Рис. 4 была реализована на базе программы Raspberry Pi3 с частотой обмена в контуре управления 50

Гц. На Рис. 10, Рис. 11 показано, что контроллер может компенсировать возмущения звеньев за счет взаимовлияния. Также приведены результаты моделирования и эксперимента. Они очень близки, таким образом, математическая модель соответствует реальному объекту управления. Из эксперимента можно сделать вывод, что благодаря алгоритму онлайн-обучения с адаптивными правилами предложенный алгоритм управления может оценивать динамику робота во время движения, а также компенсировать динамические возмущения.

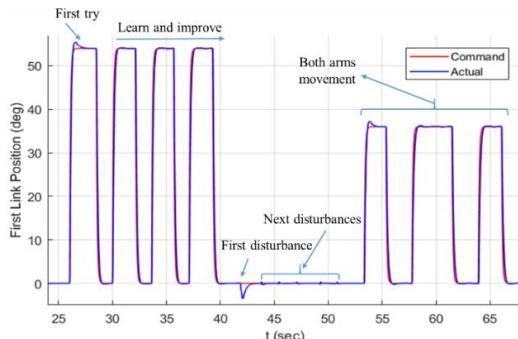


Рис. 10. Управление первым звеном

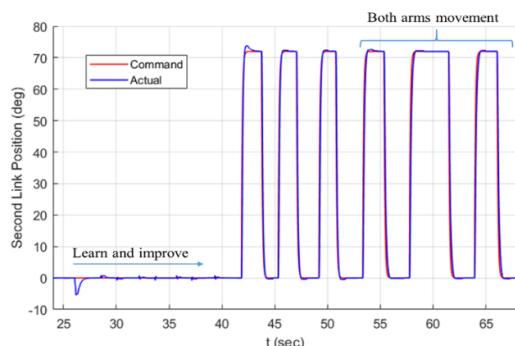


Рис. 11. Управление вторым звеном

Экспериментальные результаты предлагаемого способа управления на примере робота SCARA. Предложенный способ управления является оригинальным и удачно использует преимущества скользящего режима, нейронной сети и адаптивного управления.

В третьей главе, для того, чтобы продемонстрировать возможности разработанного способа управления, были рассмотрены примеры его применения для различных роботов. В том числе, сконструирован нейросетевой контроллер для задачи о стабилизации перевернутого маятника, который является неполностью активированной системой с одним исполнительным двигателем и двумя степенями подвижности (маятник Фурута).

Это перевернутый маятник и система управления им классифицируется как нелинейная, неминимально-фазовая, неполностью активированная система. В работе рассматривается задача вывода манипулятора в вертикальное положение и его стабилизация в этом положении. Для этого применяется адаптивная нейросеть, рассмотренная в Гл.2 и обеспечивающая рабочесть управления. Исключение феномена чаттера в стационарном режиме и оптимизация управляющего входного сигнала являются основной целью этой новой схемы управления.

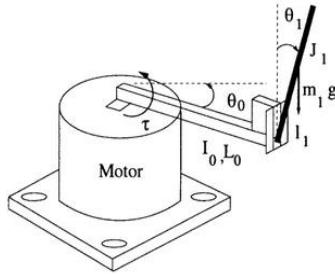


Рис. 12. Маятниковая система Фурута

Перевернутый маятник Фурута описывается уравнением:

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

Определим текущую ошибку $e(t)$ как

$$e_0 = q_{d0} - q_0, \quad e_1 = q_{d1} - q_1 \quad (14)$$

где вектор требуемого положения манипулятора $q_d(t)$ дважды дифференцируем и ограничен при $t \geq 0$.

Введем функцию $r(t) \in IR$ как фильтрованную ошибку отслеживания заданного положения как

$$r = \dot{e}_0 + \dot{e}_1 + \lambda e_1, \quad (15)$$

где $\lambda > 0$ положительный параметр. Далее вводится нейронная SHL - сеть, которая выполняет аппроксимацию динамики объекта управления. Таким образом, выбранный управляющий сигнал задается следующим выражением:

$$U = U^* + U_{cor} \quad (16)$$

$$U^* = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) + K_v r \quad (17)$$

где U_{cor} является идеальным корректирующим управлением, предназначенным для устранения «чаттера». Идеальное выражение корректирующего сигнала следует из (10),(11), а законы адаптации весовых коэффициентов сети определяются уравнениями (7) и (12). Структура контроллера аналогична показанной на Рис. 4.

Некоторые результаты экспериментов со стабилизацией маятника Фурута представлены на Рис. 13 и Рис. 14. Они показывают эффективность предлагаемого алгоритма с двойной нейронной сетью по сравнению с управлением ANN с одной нейронной сетью.

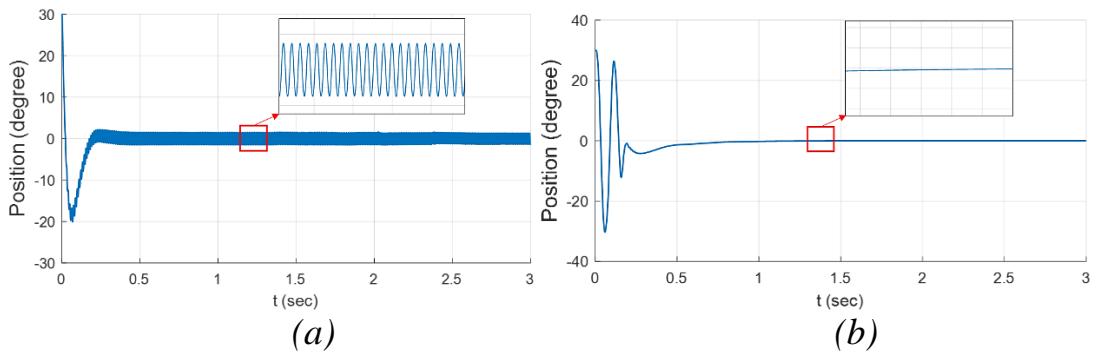


Рис. 13. Стабилизация угла маятника Фурута а) ANN - управление b)
Предлагаемое управление ANN, с компенсацией вибрации.

Для того чтобы проверить устойчивость системы, вводилось внутреннее возмущение как крутящий момент.

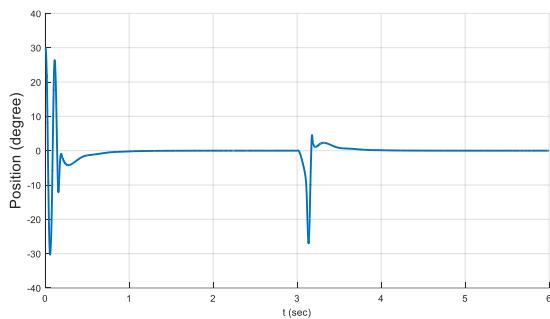


Рис. 14. Стабилизация угла маятника при действии возмущения

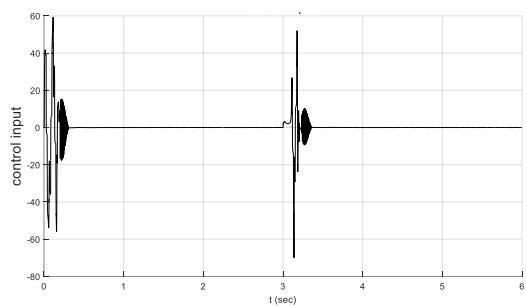


Рис. 15. Адаптация
управляющего сигнала при
действии возмущения

Из графиков Рис. 14 и Рис. 15 видно, что возмущение значительно отклоняет маятник по углу от устойчивого положения, но контроллер быстро возвращает систему в стабильное положение.

В этом разделе представлена также новая схема адаптивной нейронной сети для одновременного (гибридного) управления силой и положением рабочего инструмента робота-манипулятора с параллельной кинематикой Дельта (Delta). Цель разрабатываемого способа управления — приложить требуемую силу в заданном положении в котором присутствует ограничение движения. Предлагаемый метод позволяет решить эту задачу путем введения простой интегрированной гибридной системы управления.

В данной работе были разработаны и исследованы два подхода, чтобы выявить преимущества каждого. В первом случае был добавлен слой нейросети, который учитывает только ошибку регулирования силы на выходе исполнительного устройства. Таким образом, закон управления приобретает следующий вид

$$U_n = \hat{H} \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) + k_v s - k_s \text{sat}(s / \varphi) \quad (18)$$

Нейронная сеть состоит из трех нейронов в выходном слое, семи нейронов в скрытом слое и четырех нейронов во входном слое, где $x'_i = [e_i, \dot{e}_i, \theta_{id}, \dot{\theta}_{id}]$ для $i = 1, 2, 3$ и $x'_4 = [e_f, \dot{e}_f, F_d, \dot{F}_d]$ являются входными векторами каждого входного нейрона x , индекс i указывает номер нейрона с ошибками по положению $e_i = \theta_{id} - \theta_i$, $i = 1, 2, 3$ и по силе $e_f = F_d - F$. Таким образом, в четвертом, добавленном слое на вход нейросети подаётся ошибка по силе и её производная. Будем считать, что k_v, k_s являются константами.

Главное в данном подходе - использование другой матрицы H , которая добавляет слой к предложенной нейросети. В этом слое, в соответствии с подходом гибридного позиционно-силового управления, рассматривается только ошибка регулирования силы. Основная проблема заключается в разработке адаптивного закона для определения H как матрицы 4×3 , чтобы учесть ошибку задания силы в исполнительном устройстве для достижения целевых параметров. Предлагаемый адаптивный закон описывается уравнением:

$$\dot{\hat{H}} = F_k (\hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) s_n^T - k_n \|s_n\| \hat{H}) \quad (19)$$

где $s_n = \lambda_f [e_f, e_f, e_f]$ с положительными постоянными F_k, k_n

Во втором подходе к решению той же задачи, влияние силы учитывается для того, чтобы пересчитать фильтрованную ошибку слежения, причем веса обновляются в соответствии с новыми значениями s_f , которые определяются как:

$$s_{f_i} = \dot{e}_i + \ddot{e}_i + \lambda(t)(e_i + e_f), \quad i = 1, 2, 3 \quad (20)$$

где $e_f = F_d - F$ - ошибка в отработке заданного значения силы. Закон управления описывается выражением:

$$U_f = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x) + k_v s_f - k_s \text{sat}(s_f / \varphi) \quad (21)$$

а закон адаптации определяется системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{W}} &= F_w (\hat{\sigma} s_f^T - k \|s_f\| \hat{W}) \\ \dot{\hat{V}} &= F_v (x s_f^T \hat{W}^T \hat{\sigma}' - k \|s_f\| \hat{V}) \end{aligned} \quad (22)$$

Ниже приведены результаты моделирования предлагаемого алгоритма для решения задачи гибридного позиционно-силового управления. Рассматривалась задача завинчивания или фрезерования для дельта-робота, для решения которой необходимо силомоментное управление в определенном положении. График желаемого изменения силы показан на Рис. 19 с зданием силы равной 0,5Н в конечной точке. Сила прикладывается

к рабочему органу в направлении Z Сила регулируется, когда рабочий орган находится в стабильном положении -240 mm по высоте вдоль оси Z и робот перемещается по плоскости x-y.

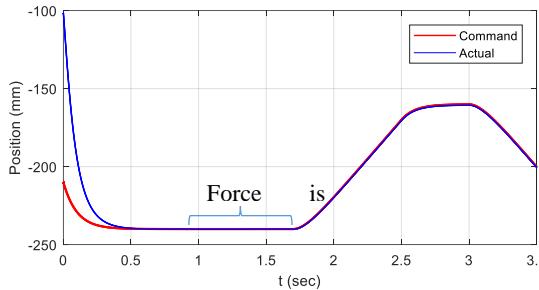


Рис. 16. Заданное и фактическое значение положения рабочего органа

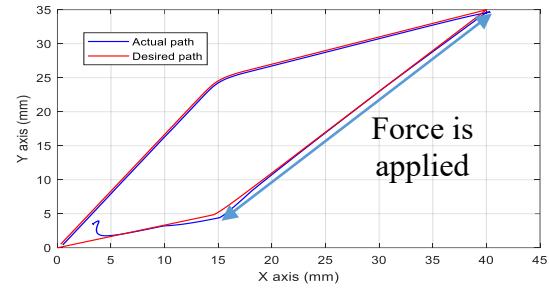


Рис. 17. Путь вдоль осей x-y во время приложения силы

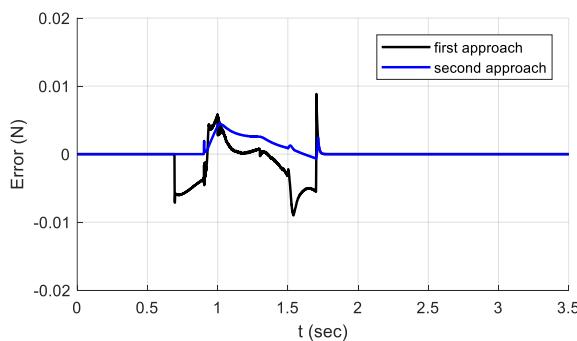


Рис. 18. Ошибка отработки силы

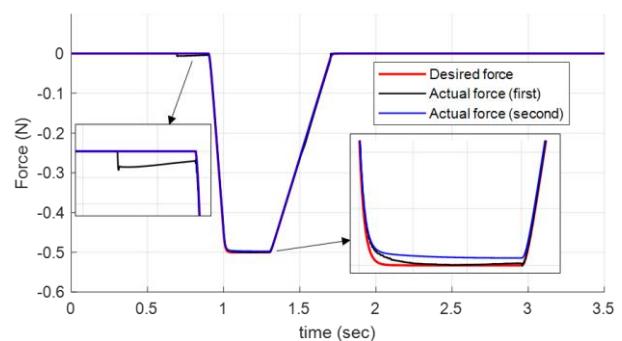


Рис. 19. Заданное и фактическое значение силы

Рис. 16 и Рис. 17 показывают траекторию слежения робота, когда сила действовала в одном направлении. Из Рис. 18 видно, что ошибка при отработке силы стремится к нулю. Это показывает возможность интегрированного регулятора управлять одновременно положением и силой.

Заданная траектория изменения положения рабочего инструмента также была достаточно точно исполнена в обоих направлениях, но для более полной оценки их эффективности была рассчитана дисперсия погрешности положения вдоль каждой оси. В результате исследования было получено, что при первом подходе ошибка уменьшилась за 15%, 11% и 23,8%, по осям x, y, z соответственно по отношению ко второму подходу.

Для того, чтобы показать, что разработанные способы управления с помощью адаптивных нейросетей могут быть использованы не только для управления манипуляторами, но и для робоотехнических систем другого типа, в данной работе предлагается решение проблемы управления квадрокоптером с помощью нейросетевого регулятора. В этом разделе

рассматривалась система управления квадрокоптером в скользящем режиме, основанная на двойном нейросетевом регуляторе (см. Гл.2). Основная нейронная сеть представляет из себя ММО - систему, аппроксимирующую управляющий сигнал для движения системы в непосредственной близости от поверхности скольжения. Вспомогательная нейронная сеть аппроксимирует корректирующий управляющий сигнал, необходимый для сглаживания эффекта высокочастотного дрожания около поверхности скольжения.

По результатам моделирования динамической модели квадрокоптера с нейросетевым регулятором и в среде MATLAB, можно сделать вывод о том, что предложенный способ управления обеспечивает устойчивое движение по заданной траектории несмотря на внешние возмущающие воздействия.

В **заключении** подведены итоги диссертационного исследования, изложены его основные выводы и обобщающие результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан метод адаптивного управления робототехническими системами различного типа с использованием нейронных сетей и скользящих режимов.
2. Разработаны способы автономного обучения системы управления с адаптивным нейроконтроллером в процессе нормального функционирования.
3. Предложена структура нейросети, позволяющей существенно уменьшить явление высокочастотных колебаний, возникающих при использовании скользящего режима
4. Разработаны некоторые новые подходы к управлению роботом, такие как он-лайн обучение сети в процессе работы, а также применение двойной нейронной сети и новая функция активации, позволяющая повысить эффективность управления.
5. Разработаны методы гибридного позиционно-силового управления с расширением адаптивной нейронной сети.
6. Рассмотрено управление не полностью активированным манипулятором Фурута с расширением адаптивной нейронной сети.
7. Разработано программное обеспечение, позволяющее проводить моделирование предложенного способа управления с применением стандартного пакета Матлаб и программы Simulink для робототехнических систем различного типа.

8. Результаты моделирования и проведенных реальных экспериментов подтвердили правильность основных теоретических положений диссертации и эффективность предложенной методики управления.

Список опубликованных работ по теме диссертации.

1. Забихифар С., Маркази А., Мадани М. Дустмохаммади Н. Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control of Under-Actuated Nonlinear Systems // International Journal of Automation and Computing, 2018, № 15, С. 364–376. (0.75п.л./0.187 п.л.)
2. Забихифар С., Ющенко А.С., Маркази А. Управление двухзвенным манипулятором с использованием нечеткого управления скользящего типа//Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Приборостроение", 2015,№ 6(105), С. 30-45. (1п.л./0.33 п.л.)
3. Забихифар С., Ющенко А.С. Нечеткое управление скользящего типа манипуляторами // Робототехника и техническая кибернетика, 2015, №. 2(7), С. 66-70. (0.31п.л./0.156 п.л.)
4. Забихифар С., Ющенко А.С., Лебедев К.Р. Управление квадрокоптером с использованием адаптивной нейронной сети // Сборник трудов Научно-технической конференции «Экстремальная Робототехника». СП-Б, ЦНИИ РТК, 2017, № 1. С. 245-250. (0.37п.л./0.125 п.л.)
5. Забихифар С., Ющенко А.С. Робастное управление вращением перевернутого маятника с помощью адаптивной нейронной сети // Сборник трудов Научно-технической конференции «Экстремальная Робототехника». СП-Б, ЦНИИ РТК, 2016, Т. 1. № -1. С. 206-224. (0.62п.л./0.31 п.л.)
6. Ющенко А.С., Забихифар С., Лебедев К.Р. Адаптивная система управления квадрокоптером //Робототехника и техническая кибернетика, 2017, № -4, С. 41-46. (0.37п.л./0.125 п.л.)
7. Ющенко А.С., Забихифар С., Лебедев К.Р. Система управления квадрокоптером на основе адаптивной нейронной сети // Наука и образование, 2017. № 7. С. 262-277. (1п.л./0.33 п.л.)
8. Забихифар С., Ющенко А.С. Управление манипулятором с использованием нечеткого управления скользящего типа // Сборник трудов конференции «Экстремальная Робототехника». СП-Б, ЦНИИ РТК, 2015. № 1 (1). С. 301-310. (0.37п.л./0.187 п.л.)