

Министерство науки и высшего образования Российской  
Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра  
Великого  
Министерство науки и высшей образования Российской  
Федерации

**Повышение качества работы робота-манипулятора  
за счет применения нейронных сетей**

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

---

Специальность 27.06.01\_01  
Стандартизация и управление качеством продукции

Выполнил аспирант:  
высшей школы киберфизических  
систем и управления, ИКНиТ,  
гр. 3562701/80101

Янь Чжэнцзе

Научный руководитель:

Профессор, д.т.н

Клочков Юрий Сергеевич

Санкт-Петербург

2022

## **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

НС – Нейро сети

АНС – Адаптивная нейронная сеть

NN – Neural network

MPC– Model predictive control

ANN – Adaptive neural network

SMC – Sliding mode control

FNN – Feedforward neural network

RNN – Recurrent neural network

SHL – Single hidden layer

LTI – Linear time invariant

ISMC – Integral sliding mode control

PSO – Particle swarm optimization

BP – Back-Propagation

RBF – Radial basis function

REMUS – Remote environmental monitoring units

DLA - Deep Learning Algorithm

LSTM - Long Short Term Memory

ANNSMC – Adaptive neural network sliding mode control

MPC- Model predictive control

# 1. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

## 1.1. Актуальность темы диссертационного исследования

Данная работа посвящена разработан новый метод управления роботом-манипулятором, который позволяет повысить точность выполнения задания за счет применения нейронных сетей, возникающих, когда приводы воспроизводят программные траектории на заданных траекториях захвата робота из-за крутящих нагрузок, вызванных комплексом. нелинейная динамическая связь приводов. В качестве специфического объекта управления был выбран робот-манипулятор, работающий в угловой системе координат. При решении ряда сложных манипуляционных задач целесообразно принимать во внимание нелинейную динамику объекта управления. К таким задачам относится, в частности, управление крупномасштабными системами после аварий и катастроф, а также в таких ситуациях, как управление медицинским роботом-манипулятором, когда условия эксплуатации нельзя предсказать заранее. Для таких манипулятивных систем задача управления усложняется, поскольку динамика управляемых структур очень сложна и в большинстве случаев не поддается полному математическому описанию. В сочетании с внешними помехами и т. д. Существующие методы управления не могут решить подобные

проблемы .

## **1.2. Степень разработанности научной проблемы.**

На ранней стадии проектирования управления роботом на основе модели обычно требуется точное описание динамики системы и физических параметров, и некоторые методы проектирования управления, такие как вычисленное управление крутящим моментом и управление обратной динамикой, могут хорошо работать на основе точной модели ( Льюис и др. 1993, Ли и Ванд Ченг 1996). Но сложно иметь точную математическую модель робота из-за наличия неопределенностей. Кроме того, из-за влияния различной полезной нагрузки может быть сложно получить адекватный метод на основе модели.

В последнее время для улучшения характеристик системы управления роботом в разработке систем управления роботами-манипуляторами были использованы калькуляторы нейронной сети (Ким и Льюис 1999, Duc and Trong 2014, Сешагири и Халил 2000, Сингх и др. 2010) Кроме того, в приводах роботов они могут быть использованы в качестве нелинейных, квази-оптимальных по времени регуляторов (Ишмуратов, Ростов, 2007). В системах компьютерного числового управления (ЧПУ) вместо традиционных сплайн-интерполяторов могут использоваться роботы нейронных

сетевых интерполяторов траекторий звеньев роботов (Терпухов и Ростов 2010, Янь и Ростов 2018).

Данная работа посвящена исследованию систем ЧПУ для роботов-манипуляторов с нейронными компенсаторами динамических ошибок в приводах звеньев робота, возникающих, когда приводы воспроизводят программные траектории на заданных траекториях захвата робота из-за крутящих нагрузок, вызванных комплексом. нелинейная динамическая связь приводов. В качестве специфического объекта управления был выбран робот-манипулятор, работающий в угловой системе координат.

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.

Действительно, классический подход МРС основан на знании динамической модели системы, согласно которой оптимальный закон управления определяется исходя из предсказания будущих значений переменных состояния. Последние разработки ориентированы на обеспечение робастности управляемой системы перед возможными неопределенностями моделирования или внешними возмущениями

при удовлетворении системных ограничений .В этом направлении в последние годы получили развитие два основных подхода – так называемые минимальные -максимальный подход, способный выполнить ограничения объекта с учетом наихудшей возможной реализации неопределенности, но ценой очень высокой вычислительной нагрузки и так называемого номинального подхода без обратной связи, где реальные ограничения уменьшаются, чтобы гарантировать, что исходные ограничения выполняются для любой возможной реализации неопределенности.В этой статье мы стремимся значительно улучшить точность управления по сравнению с исходной моделью, в Чтобы сделать предложение действительно применимым на практике, мы предлагаем надежную иерархическую многоконтурную схему управления, точнее, схему, состоящую из трех циклов: внутренний цикл, основанный на известном подходе обратной динамики, ориентированный на преобразование нелинейной ММО робототехнической системы в совокупность возмущенных линеаризованных развязанных SISO систем (количество систем равно количеству сочленений робота-манипулятора), второй контур с участием контроллера, спроектированного по так называемой Подход к управлению в режиме нейронной сети (NNM) , задачей которого является отбрасывание всех согласованных неопределенности; наконец,

внешний цикл, в котором контроллер типа MPC играет роль в оптимизации эволюции управляемой системы в отношении состояний и входных ограничений. Благодаря свойствам линеаризации и развязки внутреннего цикла, основанного на обратной динамике, и возможности контроллер NN, чтобы сделать управляемую систему нечувствительной к согласованным неопределенностям с начального момента времени, можно полагаться на стандартную методологию линейного MPC для разработки контроллера внешнего контура с явным преимуществом с точки зрения сдерживания вычислительной сложности

### **1.3. Методологическая основа исследования**

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

### **1.4 . Достоверность полученных результатов.**

В работе Янь Чжэнцзе использованы фундаментальные соотношения теории управления. Достоверность полученных результатов определяется также использованием апробированных методик и воспроизводимостью экспериментальных данных. Работа содержит оригинальный подход построения системы управления

роботом-манипулятором, которая основана на интеграции модели прогнозирования (MPC) и адаптивной нейронной сети (НС). Работа проводилась с использованием современных измерительных приборов, при обработке результатов использованы сертифицированные программные продукты.

## **1.5. Научная новизна диссертационного исследования**

- 1) Разработан метод управления сложными динамическими объектами с использованием адаптивных нейронных сетей. Адаптивная система управления позволяет эффективно управлять РТС без предварительного знания математической модели динамики объекта управления, а также обеспечивает инвариантность процесса управления по отношению к внешним воздействиям.
- 2) Предлагаемая система обладает характеристиками онлайн-обучения в процессе работы системы, не требует предварительной информации математической модели объекта управления и может быть в равной степени применима при наличии неизвестных внешних возмущений.
- 3) Предложен нейросетевой метод компенсации высокочастотных колебаний управляющего сигнала. В частности, предлагается

метод, сочетающий нейросетевую компенсацию и управление с прогнозирующими моделями.

- 4) Результаты показывают, что предложенный метод может быть использован для управления как манипулятивными роботами, так и другими типами робототехнических комплексов, в том числе механическими системами с неполной активацией подвижности, а также манипуляторами, способными управлять рабочими орудиями как по силе, так и по положению.

## **1.6. Личный вклад автора в проведенное исследование**

Автор участвовала в определении цели работы и постановке задач исследования, активно принимала участие в обсуждении результатов диссертации, написании статей и тезисов докладов. Кроме этого, автором работы получены лично автором. Автором самостоятельно проведены структурные исследования, расчет и анализ система, а также измерение и обработка эфффиктивность и динасический погрешность свойств образцов. Автор принимала участие в обработке и анализе результатов анализа. Результаты, приведенные в данной диссертационной работе, неоднократно докладывались автором на международных и российских конференциях.

## **1.7. Теоретическая значимость исследования**

Доказана возможность усовершенствовать метод управления манипуляторами через нейронные сети. Для управляемых систем управление осложняется сложной нелинейной динамикой проектирования, которая не может быть полностью описана. Преимущество использования адаптивных нейронных сетей для таких задач состоит в том, что правила управления не зависят от математической модели объекта. Еще одним преимуществом этого метода управления является то, что при наличии внешнего возмущения в системе он может быстро смоделировать и изучить неизвестные переменные и дать соответствующую компенсацию ошибки.

## **1.8. Апробация результатов исследования**

Основное содержание работы изложено в 4 статьях, опубликованных в международных физических журналах, входящих в перечень ВАК рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций и индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus.

## **1.9. Структура диссертационного исследования**

Диссертация изложена на 133 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, и содержит 31 рисунков, 4 таблиц, список используемых источников из 78 наименований.

# **2. СОДЕРЖАНИЕ, ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Введение** содержит общее описание работы: описывает структуру работы, подтверждает актуальность темы исследования, отражает научную новизну и практическую значимость полученных результатов. Также перечислены цели и конкретные задачи, которые необходимо решить в процессе исследования, и перечислены основные регламенты представления защиты. Также предоставляется информация о результатах работы.

**В главе 1** представлен обзор литературы по теме диссертации. В этой главе специально представлены характеристики управления нейронной сетью и его теоретическая основа. Кроме того, представлены современные методы на основе нейронных сетей, в том

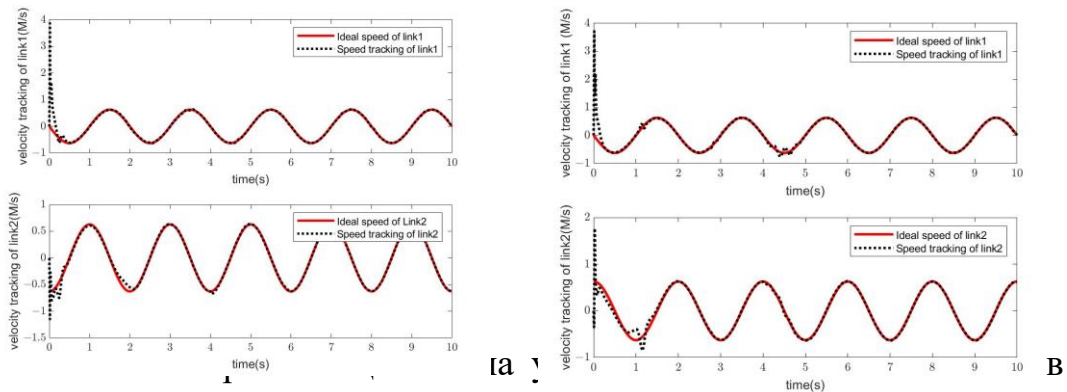
числе адаптивные нейронные сети и их основные преимущества. В этой главе также описывается, как этот метод позволяет системе достигать идеальных условий работы даже при наличии неизвестных динамических моделей и внешних возмущений, и приводятся данные по изучению таких методов управления. На основе анализа литературы сформулированы цель и задача диссертационной работы.

**Во главе 2** в основном описывается модель системы и предлагается разница между традиционным режимом управления и управлением нейронной сетью. И теоретическое подтверждение достигается путем анализа моделирования. Посредством анализа динамической ошибки манипулятора сравнивается компенсация динамической ошибки двух методов. Подтверждено превосходство и высокая оперативность нейросетевого компенсатора.

**Главы 3 и 4 содержат основные результаты диссертационной работы.**

**Глава 3** описывает результаты, полученные на двух разработанных методах управления адаптивной нейронной сетью. Традиционный ПИД-регулятор заменяется переработанной нейронной сетью, а также добавляется модуль нечеткого управления. Это позволяет манипулятору работать в условиях неизвестной динамической модели и достигать хороших результатов управления. И даже при наличии внешних помех погрешность может быть

компенсирована за очень короткое время.



случае адаптивной компенсации Elman и RBF

В этом разделе предлагаемая схема управления применяется к 2-звенному роботу, математическая модель которого разработана в пакете Simulink и Modeling with S-function

В системе Matlab/Simulink была создана модель искусственной нейронной сети для управления манипулятивным роботом, содержащая входной слой из 15 нейронов и скрытый слой из 12-19 нейронов, имеющих локальную обратную связь через линии задержки.

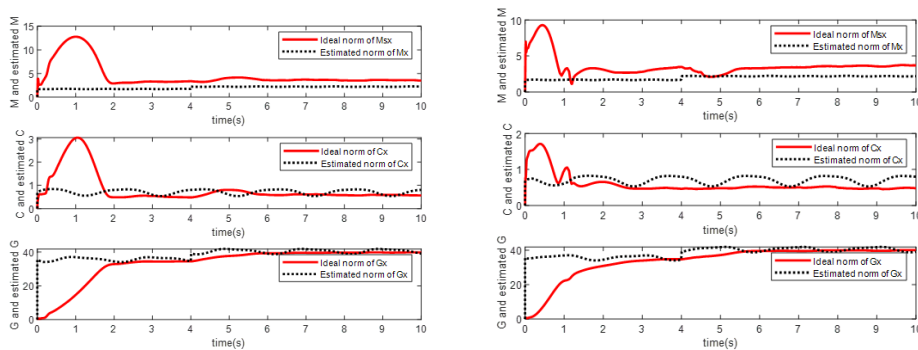


Рис. 3. Аппроксимация переменных  $\|M_x(q)\|$ ,  $\|C_x(q, \dot{q})\|$  and  $\|G_x(q)\|$  адаптивной нейронной сетью Elman и RBF

Как видно из рисунка 2 и рисунка 3, в начале моделирования

значение ошибки было относительно большим из-за фазы обучения нейронной сети управляющему входу. Когда нейросетевой компенсатор прошел стадию обучения, ошибки были в основном устранены, и траектория движения и расчетное значение сходились в нейронной сети RBF относительно быстро, но обучение нейронной сети и точность компенсации были ниже, чем у нейронной сети Элмана в прежнем. Неизвестное возмущение было почти полностью подавлено через 1 с.

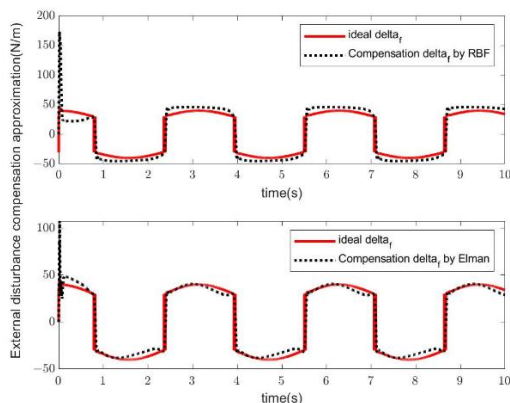


Рис.4. Компенсация внешних помех с помощью сетей Elman и RBF.

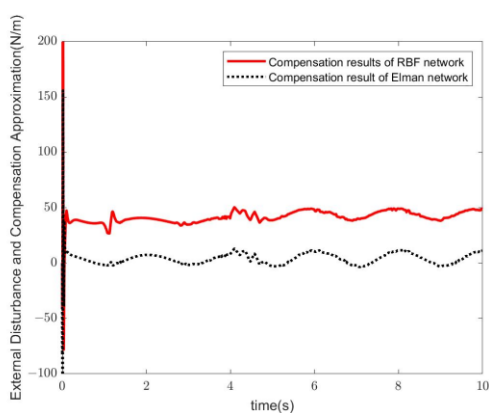


Рис.5. Сравнительный анализ компенсации внешних возмущений сети Elman и сети RBF.

Из моделирования двух нейронных сетей на рисунках 4 и 5 видно, что, хотя нейронная сеть RBF имеет более высокую скорость обучения и обучения при том же планировании траектории. Но нейронная сеть Элмана лучше с точки зрения точности компенсации внешних возмущений и ошибок. Однако, когда было больше условий помех и неопределенной среды, общие результаты обучения RBF были лучше.

Теоретически, по мере добавления достаточного количества нейронов к скрытому слою сети Элмана будут получены более высокие ожидания в отношении обучения. Однако в реальной симуляции, как только количество нейронов в скрытом слое превысит 60, нейронная сеть окажется в состоянии избыточного обучения, и точность упадет.

Из графиков видно, что возмущения были практически полностью скомпенсированы, и процесс управления роботом достаточно удовлетворительный.

И путем сравнения с экспериментальными результатами второй части можно сделать вывод, что он сравнивается с ПИД-регулятором и традиционной нейронной сетью RBF. Адаптивные нейронные сети Elman и RBF имеют более быстрое время отклика при неизвестных внешних возмущениях. С точки зрения точности компенсации ошибок показатели во второй части лучше. Но в реальном

промышленном производстве такие идеальные условия трудновыполнимы. Следовательно, метод адаптивного управления, предложенный в этом разделе, имеет большую применимость.

Экспериментальные результаты доказывают также, что предлагаемый подход достаточно устойчив к динамическим возмущениям, обусловленные взаимовлиянием динамики звеньев. Предложенный способ управления является оригинальным и удачно использует преимущества SMC, нейронной сети и адаптивного управления.

**Во главе 4** основном описывается ссылка на модель прогнозирующего управления (MPC) в управлении манипулятором. Этот метод управления MPC предназначен для достижения эффекта аппроксимации MPC с помощью нейросетевого контроллера. А также проанализированы преимущества нейросетевого контроллера в эффективности управления, времени отклика системы и экономичности, а также показаны преимущества вышеперечисленных методов управления в практическом промышленном производстве.

Быстрое управление с обратной связью и повышение безопасности являются очень важными составляющими современной робототехники. Мы предлагаем подход, сочетающий новую надежную модель прогнозирующего управления (MPC) с

аппроксимацией функций с помощью нейронных сетей (NN). Результатом является новый метод управления сложными задачами с нелинейной, неопределенной и ограниченной динамикой, который пользуется большим спросом в современной области робототехники. В частности, мы используем последние результаты исследований MPC, чтобы предложить более стабильный алгоритм отслеживания заданных значений MPC, который обеспечивает надежное и безопасное отслеживание динамических заданных значений, обеспечивая при этом стабильность и соответствие внешним ограничениям. Предлагаемая надежная схема MPC представляет собой одноуровневый подход, который объединяет обычно разделенные уровни планирования и управления путем прямого вычисления управляющих команд после расчетов на основе известных состояний или положений препятствий, предоставленных датчиками. Точно так же мы значительно сокращаем время вычисления MPC, аппроксимируя метод MPC с помощью контроллера NN, используемого для замены обычного ПИД-регулятора. NN обучается и проверяется с помощью автономных образцов MPC, генерируя статистические гарантии, которые используются вместо него во время выполнения. .

В этой части проводятся эксперименты по отслеживанию траектории робота-манипулятора, чтобы продемонстрировать

эффективность предлагаемого метода управления.

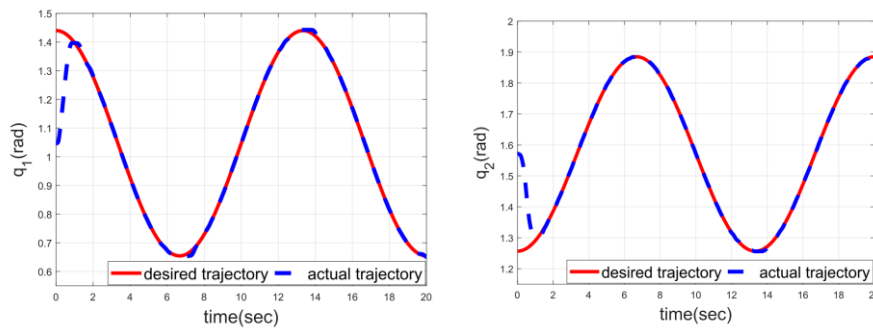


Рис 6 . Отслеживание траектории при первом и втором звень

Экспериментальные результаты представленной стратегии управления показаны на рис 6 демонстрируют ошибки отслеживания суставов и ошибки отслеживания двух суставов соответственно. Ошибки отслеживания  $e_i = q_{di} - q_i, i = 1,2$  могут сходиться к  $\Omega_{e_i} := \{e_i \mid |e_i| \leq 0.02\}$  в течение 2 s . На рис. 8 показаны ошибка запуска и ее порог. На рис. 7 показаны входные крутящие моменты робота-манипулятора.

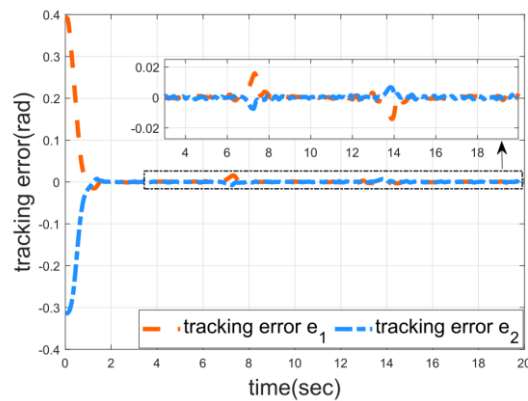


Рис 7. Ошибка отслеживания двух звеньев манипулятора

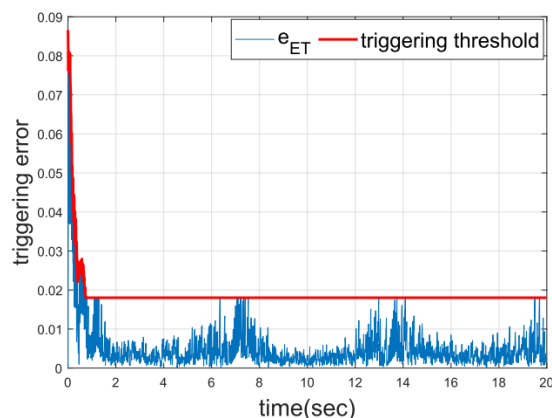


Рис 8.Настройки порога ошибки и срабатывания

Эффективность событийного механизма. Целью введения этого механизма является повышение эффективности вычислений, что поясняется на рис. 8. Видно, что в начале ошибка срабатывания всегда достигает порога, и ОП МРС приходится решать часто. При изучении прогностической модели и конечной стоимости ошибка срабатывания ниже предела, за исключением случаев, когда меняется знак скорости сустава. Когда ошибка запуска ниже своего порога, МРС решается только на прогнозируемом горизонте  $T$  в соответствии с (64). Результаты показывают, что ОП МРС решается 447 раз.

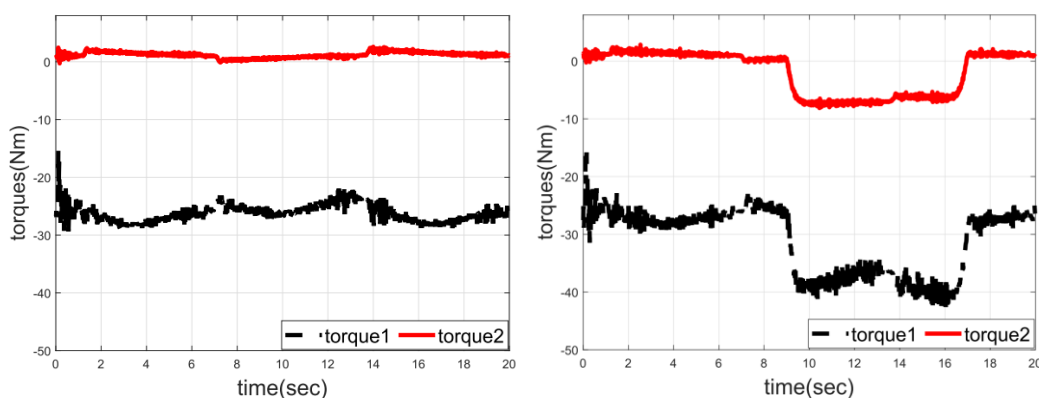


Рис 9.Управление крутящим моментом без внешних возмущение и с  
внешних возмущение

Для анализа устойчивости к внешним возмущениям к крутящим моментам суставов при  $t = 10$  с добавляется дополнительный крутящий момент  $\tau_{dis} = [13, 8]T$ , чтобы имитировать возмущение

робота внешними силами. Затем  $\tau_{dis}$  отменяется при  $t = 16$  с.. На рис. 7 показано, что характеристики управления могут поддерживаться при дополнительных помехах, что подтверждает надежность предложенного метода. Замечено, что решение ОП для MPC будет запускаться при возмущении манипулятора робота (что означает изменение динамической модели манипулятора робота), сравнивая рис. 9 с рис. 8.

Таким образом, MPC с конечной стоимостью обучения, предложенный в этой статье, имеет конкурентоспособную производительность как в переходном, так и в установившемся режиме реакции благодаря введению оценки онлайн-модели. Его вычислительная нагрузка приемлема. Он также устойчив к дополнительным помехам. Анализ иллюстрирует что представленный метод имеет потенциал для применения к задачам отслеживания управления различными системами, такими как мобильные роботы, что также является одной из ключевых целей исследований в будущем

**Во главе 4** основном нацелена на метод объединения части предсказания модели и нейронной сети, а эффективность метода управления проверяется по результатам имитационного эксперимента. и оценили экономичность метода.

**В заключении** сформулированы основные выводы по

диссертационной работе.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы изучили нейронное управление обучением для робота манипулятора с неизвестной системой динамики по назначению ограничения производительности. Была введена функция производительности описать конкретные ограничения, то ограниченный ошибки отслеживания были преобразованы в безусловные методом преобразования производительности. введение ошибки фильтрации упростило конструкцию контроллера и анализ устойчивости. Роботизированная неизвестная динамика была аппроксимируется NN RBF и NN Elman. А путем объединения прогнозирующего управления моделью с нейронной сетью можно получить адаптивную прогнозирующую модель в условиях неизвестной модели манипулятора.

При Подтверждено статьями и экспериментами получены следующие результаты:

- 1) В начале периода управления ( $t \leq t_b = 1$  с) все четыре метода имеют одинаковое быстродействие. Предлагаемый метод и стратегия ПИД-регулятора сходятся быстрее. Эти два метода имеют лучшую локальную производительность за счет решения МРС. в конечном горизонте. Но ПИД-регулятору нужна точная

информация о модели манипулятора

- 2) По сравнению с традиционным управлением нейронной сетью модели адаптивного управления RBF и Elman, разработанные в этой статье, имеют более высокую скорость отклика, и после применения внешнего возмущения система может сходиться в течение 1,5 с, а управление моделью и ошибки могут быть компенсированы.
- 3) Таким образом, MPC с конечной стоимостью обучения, предложенный в этой статье, имеет конкурентоспособную производительность как в переходном, так и в установившемся режиме реакции благодаря введению оценки онлайн-модели. Его вычислительная нагрузка приемлема. Он также устойчив к дополнительным помехам. Анализ иллюстрирует что представленный метод имеет потенциал для применения к задачам отслеживания управления различными системами, такими как мобильные роботы, что также является одной из ключевых целей исследований в будущем

# **Основные результаты диссертационной работы представлены в следующих публикациях**

- 1) “Модель адаптивной нейронной схемы управления нелинейными динамическими системами манипуляционного робота“, Информатика и вычислительная техника и управление, Естественные и технические науки №8 август 2020 г, DOI 10.37882/2223–2966.2020.08.40
- 2) “Improving the Accuracy of a Robot by Using Neural Networks (Neural Compensators and Nonlinear Dynamics)”, MDPI Robotics 2022, Volume 11, Issue 4, 83,
- 3) Neural network compensation of dynamic errors in a position control system of a robot manipulator “, Computing Telecommunications and Control, Vol.13, No.1, 2020, DOI:10.18721/JCSTCS.13105, УДК004.896.