



АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ  
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ  
AUTOMATION AND CONTROL

DOI 10.51885/1561-4212\_2022\_3\_182

MPHTI 28.15.19; 55.30.31

**А.Ж. Оразова<sup>1</sup>, А.Т. Кадыролдина<sup>2</sup>, М.Б. Толыкбаева<sup>3</sup>, А.Л. Красавин<sup>4</sup>, Д.Л. Алонцева<sup>5</sup>**  
Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск,  
Казахстан

<sup>1</sup>E-mail: arailym-vko@mail.ru

<sup>2</sup>E-mail: akadyroldina@gmail.com\*

<sup>3</sup>E-mail: maralsamekenova@mail.ru

<sup>4</sup>E-mail: akrassvin@edu.ektu.kz

<sup>5</sup>E-mail: dalontseva@edu.ektu.kz

## НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ-МАНИПУЛЯТОРАМИ – КРАТКИЙ ОБЗОР ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ

### РОБОТ-МАНИПУЛЯТОРЛАРДЫ СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС БАСҚАРУ – СОҒҒЫ ЖЕТІСТІКТЕРГЕ ҚЫСҚАША ШОЛУ

#### NONLINEAR CONTROL OF ROBOT MANIPULATORS – A BRIEF OVERVIEW OF RECENT ADVANCES

**Аннотация.** Современные технологии, использующие роботы-манипуляторы, требуют сложных законов управления, чтобы обеспечить точное и быстрое выполнение технологического процесса, тем самым подчеркивая все более заметное положение нелинейных систем управления, что и является темой этой статьи. Последние достижения в нелинейных системах управления роботами-манипуляторами с точки зрения их приложений рассматриваются с критическими комментариями по связанным с ними проблемам. Ожидается, что широкое распространение этого обзора будет стимулировать более тесное сотрудничество между исследователями в мультидисциплинарных областях и способствовать дальнейшим разработкам.

**Ключевые слова:** нелинейное управление, робот-манипулятор, технологические приложения.

**Аңдатпа.** Робот-манипуляторларды қолданатын заманауи технологиялар процестің дәл және жылдам орындалуын қамтамасыз ету үшін күрделі басқару заңдарын қажет етеді, осылайша осы мақаланың тақырыбы болып табылатын сызықты емес басқару жүйелерінің маңыздылығын баса көрсетеді. Робот-манипуляторларды сызықты емес басқару жүйелеріндегі соңғы жетістіктер, олардың қосымшаларына байланысты мәселелер бойынша сыни пікірлермен қарастырылады. Бұл шолудың кең таралуы мультидисциплинарлық салаларда ғылыми-зерттеу қоғамдастығы арасындағы тығыз ынтымақтастықты ынталандырады және одан әрі дамуға ықпал етеді деп күтілуде.

**Түйін сөздер:** Сызықты емес басқару, робот-манипуляторлар, технологиялық қосымшалар.

**Abstract.** Modern technologies using robotic arms require complex control laws to ensure an accurate and fast technological process, thereby emphasizing the increasingly prominent position of non-linear control systems, which is the topic of this article. Recent advances in non-linear robot manipulator control systems from an application point of view are reviewed with critical commentary on related issues. It is expected that the wide dissemination of this review will stimulate closer collaboration between the research community in

*multidisciplinary fields and encourage further developments.*

**Keywords:** *Nonlinear control, robot manipulators, technological applications.*

*Введение.* В настоящее время разработка новых нелинейных алгоритмов управления многозвенным роботом-манипулятором находится в центре внимания мировых научных исследований, представляя значительный научный и практический интерес применительно к конкретным технологическим процессам.

Целью данной обзорной статьи является критический анализ современных исследований в области нелинейного управления роботами-манипуляторами, чтобы представить последние достижения в этой области с точки зрения их приложений и вызовы, связанные с перспективами промышленного внедрения нелинейного управления. Ожидается, что данный обзор будет стимулировать более тесное сотрудничество между исследователями в различных областях, включающих использование и управление роботами-манипуляторами, а также способствовать дальнейшим разработкам для внедрения в производство.

Для анализа использованы достоверные открытые источники информации, включающие в основном исследовательские статьи в рецензируемых журналах за последние 5 лет.

*Литературный обзор.* Робот-манипулятор стал неотъемлемой частью современной промышленной автоматизации. Так как характеристики роботов-манипуляторов позволяют осуществлять технологический процесс с прецизионной точностью и высокой производительностью, применение их в промышленности неуклонно расширяется: роботы применяются для нанесения покрытий, операций погрузки и упаковки, на сборочных конвейерах автомобильных и машиностроительных предприятий и т.д. Также важно, что автоматизация производства с помощью роботов-манипуляторов позволяет осуществлять длительные технологические процессы в тяжелых или вредных для человека условиях, без непосредственного участия человека.

В настоящее время за счет автоматизации процессов термического плазменного напыления стало возможным применять эти технологии для аддитивного производства многослойных функциональных покрытий [1-4]. Это весьма перспективное направление, позволяющее получать слой за слоем покрытия для медицины [1, 2] или электроники [3, 4] с желаемой композицией и микроструктурой по заданной 3D-модели изделия.

В то же время целый ряд вызовов по-прежнему существует для внедрения технологии термического напыления непосредственно в производство аддитивных покрытий. В том числе вызовом, на котором сфокусировано внимание целого ряда исследователей в области автоматизации и робототехники, остается такое управление роботом-манипулятором, которое позволило бы осуществлять быстрое и точное перемещение рабочего инструмента (например, плазмотрона) по заданной 3D-траектории [5-8], что необходимо для аддитивного производства покрытий. Роботы-манипуляторы управляются при помощи программируемых контроллеров. Большая часть промышленных контроллеров использует общий принцип управления, а именно – линейный алгоритм пропорционального управления для каждого звена, где корректируется пространственное положение рабочего инструмента, а сигналом обратной связи является положение инструмента. Однако многозвенные манипуляторы представляют собой существенно нелинейную динамическую систему. Использование классических линейных методов теории автоматического управления для контроля роботов-манипуляторов налагает сильные ограничения на скорость прохождения заданной траектории. Кроме того, зачастую роботы-манипуляторы подвержены воздействию быстро изменяющихся во времени факторов: неопределяемым нагрузкам на рабочий инструмент, вибрациям и т.п. По

мнению ряда исследователей [9-12], создание линейных систем управления манипуляторами, обладающих робастностью, позволяющей нивелировать воздействие таких факторов, невозможно в принципе.

В последние годы учеными и специалистами-разработчиками в области автоматического управления и робототехники проводятся исследования по применению нелинейных методов управления (таких как линеаризация сигналов обратной связи и применение нелинейных законов управления), дающих обнадеживающие результаты [13-20]. Одним из основных мотивов интереса специалистов к нелинейным методам управления является возможность улучшения характеристик системы управления нелинейным объектом управления (в сравнении с применением для того же объекта линейных методов управления). Применение нелинейных методов для управления механическими системами может давать существенные преимущества над классическими линейными методами за счет учета сил, величина которых нелинейно зависит от скорости (например, центробежной силы и силы Кориолиса). Применение линейных законов управления (например, ПИ и ПИД регуляторов) в подобных случаях налагает серьезные ограничения на максимальную величину скорости движения объекта, при которой система управления может гарантировать заданную точность. В то же время достаточно простой нелинейный контроллер управления позволяет в значительной степени компенсировать влияние подобных сил, нелинейно зависящих от скорости, таким образом позволяя достигнуть высоких скоростей при сохранении лимитов на точность.

Другой важной причиной, заставляющей обратиться к применению нелинейных методов управления, являются существенные нелинейности объекта управления, такие как «мертвые зоны», математически описываемые разрывными функциями, наличие гистерезиса в системе и т.п., не допускающие линейной аппроксимации. Нелинейные методы позволяют учитывать подобные нерегулярности и компенсировать их, что иногда в принципе невозможно для линейных методов. Более того, реальным объектам управления часто присущи нерегулярности в зависимостях от параметров, медленно дрейфующих во времени (таких как величины коэффициентов трения скольжения и качения) или параметров, величины которых способны к резким изменениям во времени. Применение нелинейных контроллеров для управления подобными объектами позволяет достигнуть необходимой робастности и адаптивности системы управления.

В целом, линейно неконтролируемая/ненаблюдаемая система может быть нелинейно контролируемой/управляемой. Управление высокоточными роботами-манипуляторами, способными к движению с высокими скоростями, предъявляет высокие требования к контроллеру управления роботом. Позиционирование таких роботов является нелинейной задачей, поскольку математическая модель манипулятора включает матрицы преобразования координат, имеющие синусные и косинусные члены. Линейное управление манипуляторами предполагает, что каждый сустав является независимым и учитывает моменты инерции, «видимые» контроллерами привода каждого сустава как константы. Это приближение приводит к целому ряду нежелательных эффектов. Рассмотрим более подробно предлагаемые подходы к нелинейному управлению роботами-манипуляторами, позволяющие избежать подобных недостатков.

Основной подход, разработанный для нелинейных систем управления, основан на идее преобразования нелинейной динамики в линейную форму. Основная идея заключается в алгебраическом преобразовании нелинейной динамической системы в полностью или частично линейную, чтобы можно было применять методы линейного управления. Этот подход может быть использован как для целей стабилизации, так и для целей управления

системами с одним входом и одним выходом (SISO) или с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO), а также успешно применен к ряду практических задач нелинейного управления.

В частности, Гозлан и Кнани [13] применили вышеупомянутый подход для управления роботом-манипулятором с шестью степенями свободы, выполняя два основных шага: во-первых, используя описанный выше подход и диффеоморфное преобразование, авторы [13] преобразовали нелинейную и несвязанную динамическую модель робота в линейную систему, во-вторых, разработали линейный пропорционально-дифференциальный закон управления (ПД) для каждой несвязанной подсистемы для управления угловым положением каждого сустава этого робота в целях отслеживания. Диффеоморфизм — это отображение определённого типа между гладкими многообразиями, в данной работе [13] использовались группы Ли, которые являются в смысле богатства структуры лучшими из многообразий.

Главной целью линеаризации с обратной связью является разработка закона нелинейного управления, поскольку предполагается, что управление внутренним контуром в наиболее подходящем случае точно линеаризует нелинейную систему после соответствующей модификации пространства состояний координат. Разработчик может построить внешнее управление контуром в новых координатах, чтобы получить линейную зависимость между выходом  $Y$  и входом  $X$ , и удовлетворить традиционные требования к структуре управления, такие как отслеживание и учет возмущений.

Основным условием использования метода линеаризации с обратной связью является нелинейный динамический MIMO  $n$ -го порядка с  $r$ -м числом входов и выходов, описанных в аффинной форме, где выходной сигнал, входное и управляющее воздействия являются векторами состояния системы, представляя  $n$ -мерные гладкие векторные поля. Диффеоморфизм используется для преобразования одной нелинейной системы в другую нелинейную систему, чтобы получить линейную зависимость между входами и выходами путем дифференцирования выходов  $y_j$ . Чтобы найти выражение нелинейного закона управления  $U$ , которое позволяет сделать зависимость между входом и выходом линейной, используется матричная форма записи уравнений и их линеаризация.

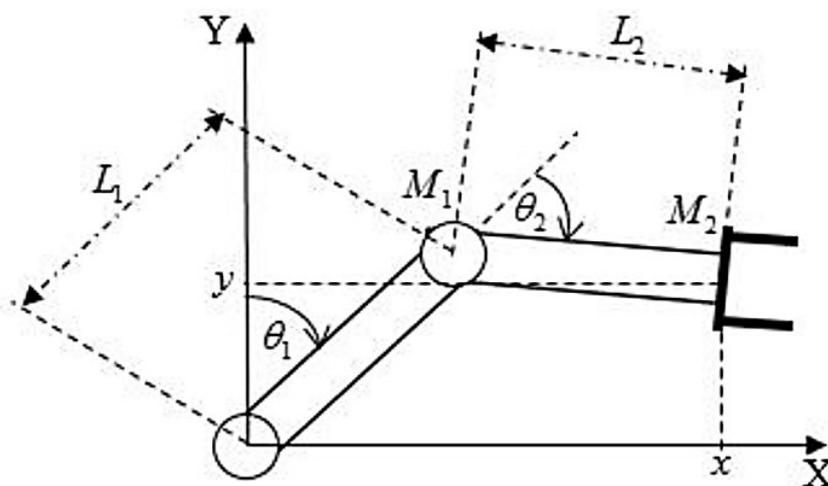
Авторы [13] применили описанный выше подход к динамической многомерной системе, которая представляет собой манипулятор робота с шестью степенями свободы «EPSON C4». Они проанализировали эволюцию движения этой механической нелинейной системы, используя уравнения Эйлера-Лагранжа. Полученные результаты в различных симуляциях проиллюстрировали точность предложенного подхода.

Баккуш и Доддс [14] разработали надежный, быстрый и практичный пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор для двухзвенного робота-манипулятора, как для классической двойной маятниковой системы, используя уравнение Эйлера-Лагранжа для определения крутящих моментов, приложенных к каждому звену. После получения уравнения движения моделирование управления было представлено с помощью MATLAB и также показало неплохие результаты.

Икбал Дж. [15] для разработки законов управления роботом-манипулятором использовал модельное прогнозирующее управление (MPC). MPC — это метод управления, который предсказывает будущее поведение системы на основе текущих состояний и реакций. Чтобы обеспечить лучшую производительность отслеживания в ограниченных условиях, для вычисления будущих значений используется онлайн-процесс. Затем формулируется оптимизированный управляющий сигнал, учитывающий как результаты прогнозирования, так и поведение системы в прошлом. Закон управления обеспечивает

надежность системы и высокую производительность, несмотря на неопределенности и помехи. В этом законе управления предполагается, что все состояния системы и возмущения могут быть отправлены в качестве обратной связи для создания замкнутой системы. Законы управления основываются на полученной кинематике и динамике роботизированной руки. Кинематическое моделирование включает расчет положения и ориентации конечного эффектора на основе углового положения шарниров робота без учета связанных с ними сил. Динамическая модель роботизированной руки дает информацию о крутящем моменте и других силах, приводящих к движению робота. Динамическая модель создается с использованием уравнений Ньютона-Эйлера и Эйлера-Лагранжа.

Гечи Эль-Хади и др. [16] для управления двухзвенной роботизированной рукой использовали комбинированный подход, включающий линеаризацию с обратной связью и МРС. Основной подход к управлению был основан на динамической модели робота (рис.1). Поскольку модель робота была нелинейной, на первом этапе использовалось управление с обратной связью и была применена линеаризация для получения линейной системы, где устанавливалось соответствие так называемых синтетических управляющих сигналов с соответствующими углами соединения (сустава робота), показанными на рис.1.



**Рисунок 1.** Схематическое изображение двухзвенного робота-манипулятора с указанием системы координат  $XY$ , длины звеньев  $L$ , крутящих моментов  $M$  и углов  $\Theta$  по данным [16]

На основе полученной линейной модели был разработан модельный подход к прогностическому управлению (рис. 2). Таким образом, предлагаемое решение представляло собой тип нелинейного легко настраиваемого каскадного контроллера.

Чтобы показать эффективность предлагаемого подхода, авторами [16] было проведено сравнительное исследование, показавшее, что предложенные подходы обеспечивают лучшую производительность системы, чем метод ПИД-регулирования, предложенный Дэвидом и Роблесом [17].

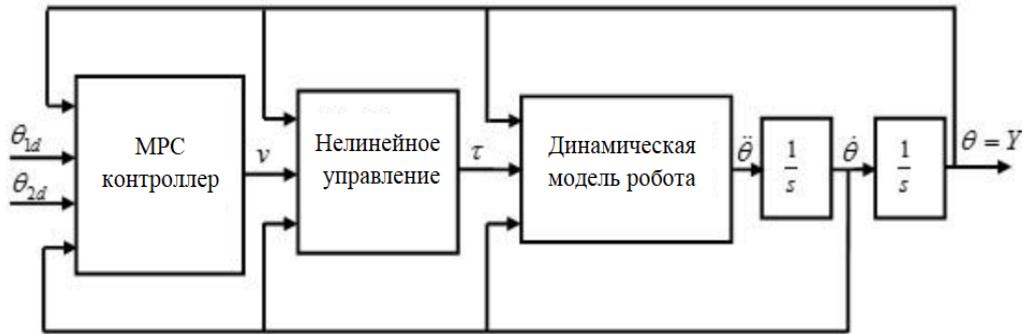


Рисунок 2. Модель прогнозирующего управления по данным [16]

Хуррам Али и др. [18] для управления движением робота-манипулятора по требуемой траектории разработали алгоритм адаптивного робастного управления с использованием скользящего режима управления (SMC) и модели трения Люгре, а для стабильности системы был предложен подход Ляпунова. Отрицательный аспект предлагаемого подхода с компенсацией трения заключается в том, что не учитывается температурное влияние на параметры и работу сочленений робота, а также что для решения проблем вибрации приходится вводить большие значения управляющих коэффициентов. На практике суставы робота нагреваются из-за трения после того, как манипулятор работает в течение некоторого времени, а также робот может эксплуатироваться при низких или высоких температурах, так что надо учитывать температурные эффекты.

Вакар А. и др. [19] также использовали подход к управлению шарнирами манипулятора с учетом динамики привода, математической модели системы, разработанной с использованием уравнений Эйлера-Лагранжа, и скользящего закона управления (SMC), основанного на принципе теории управления переменной структурой. Показано, что SMC является одним из надежных методов нелинейного управления, обеспечивая устойчивость системы к согласованным неопределенностям.

Таким образом, показано, что линейное управление, успешно применяемое десятилетиями, может не быть в состоянии обслуживать современные и передовые технологии, использующие роботы-манипуляторы с несколькими степенями свободы, для которых нелинейное управление является необходимостью. Однако существует целый ряд вызовов, связанных с применением нелинейного управления такими роботами.

Решение о выборе линейного или нелинейного управления для конкретного приложения может быть трудным. Линейное управление хорошо проверено и апробировано для промышленных применений. Для линейных систем доступно множество отличных инструментов анализа, таких как критерии устойчивости Найквиста, преобразование Лапласа, Z-преобразование и преобразование Фурье и т.д. Напротив, нелинейная система требует сложного математического анализа, применения таких методов, как например: критерий устойчивости по Ляпунову, критерий Попова, методы сингулярных возмущений. Математическое моделирование также может быть громоздким для нелинейных систем. Нелинейная система может быть подвержена хаотическим возмущениям и бифуркациям. Большинство схем нелинейных систем могут обеспечить только локальную устойчивость, в то время как полная устойчивость не может быть гарантирована [20].

Кроме того, одним из основных ограничений для реализации передовых подходов к нелинейному управлению может быть требуемая высокая вычислительная мощность. Может потребоваться более эффективное программирование для

уменьшения вычислительных затрат. Например, для управления двухзвенным роботом встроенные функции MATLAB могут быть заменены более эффективными S-функциями C/C++[20].

Стоимость оборудования для прототипирования нелинейного управления по-прежнему очень высока. Для коммерциализации этих передовых методов пока нет доступного дешевого, портативного и функционального оборудования.

Несмотря на то, что сатурация исполнительного механизма обычно имеет место и при линейном управлении, она может быть более проблематичной и даже катастрофичной в случае нелинейного управления, поскольку управляющий сигнал здесь очень мощный и агрессивный. Следовательно, это легко приводит к зависанию системы. В качестве одного из подходов для решения проблем насыщения привода в эталонную модель адаптивного контроля роботизированной руки можно включить противоаварийный компенсатор, однако противоаварийные компенсаторы обычно ухудшают работу схемы управления [20].

Нелинейные системы управления могут нуждаться в более дорогих исполнительных механизмах, чтобы дольше работать. Большинство нелинейных контроллеров представляют большой риск повреждения дорогостоящих систем, если их не применять с осторожностью. Кроме того, может потребоваться сложный процесс настройки.

По вышеупомянутым причинам есть трудности промышленного внедрения нелинейного управления роботами-манипуляторами. Промышленность по-прежнему опирается в основном на простые традиционные линейные схемы. Необходима дополнительная работа, чтобы уменьшить сложность этих передовых нелинейных стратегий и сделать их более привлекательными для промышленного внедрения. Необходимы значительные усилия по разработке надежных и достаточно просто реализуемых нелинейных алгоритмов, чтобы убедить инженеров-производственников (специалистов по управлению) адаптировать современные нелинейные методы к нуждам промышленности.

*Заключение.* Обзор современной литературы показал растущие потребности производств, использующих роботы-манипуляторы, в применении нелинейных подходов к управлению ими. В данном обзоре кратко описываются основные современные подходы и методы реализации нелинейного управления многозвенными манипуляторами, а также в статье показаны основные достоинства и вызовы, связанные с применением и промышленным внедрением современных продвинутых методов нелинейного управления роботами-манипуляторами. Данный обзор стимулирует более тесное сотрудничество между исследователями в различных областях, включающих использование и управление роботами-манипуляторами, а также может способствовать дальнейшим разработкам для внедрения в производство.

*Благодарность.* Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP13068317).

#### References

1. Kalita V.I., Plasma spraying for additive preparation technology of 3D bioactive coatings with a new type of porous ridge/cavity structure // SSRN Electronic Journal. – 2020. – DOI: 10.2139/ssrn.3702819.
2. Kalita V.I., Malanin D.A., Mamaev A.I., Mamaeva V.A., Novochadov V.V., Komlev D.I., Komlev V.S., Radyuk A.A., 3D bioactive coatings with a new type of porous ridge/cavity structure // Materialia 15 (2021). – DOI:10.1016/j.mtla.2021.101018.
3. Tejero-Martin, D., Rezvani Rad, M., McDonald, A. et al., Beyond Traditional Coatings: A Review on Thermal-Sprayed Functional and Smart Coatings // Journal of Thermal Spray Technology. – 2019. – Vol. 28. – Pp. 598-644. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00857-1>.

4. Sarobol P., Cook A, Clem P.G. et al., Additive Manufacturing of Hybrid Circuits // *Annual Review of Materials Research*. – 2016. – Vol. 46(1). – Pp. 41-62. – DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-031632.
  5. Kadyroldina A.T., Orazova A.Zh., Krasavin A.L., Kazantsev I.G., Dyomina I.A., Alontseva D.L. Development of new control algorithms for a robotic arm equipped with a 3D scanning or machine vision system // *Вестник ВКТУ им. Д. Серикбаева*. – 2022. – №1. – С. 39-59. – DOI 10.51885/1561-4212\_2022\_1\_39.
  6. Kussaiyn-Murat A., Krasavin A., Alontseva D., Kadyroldina A., Khozhanov A., Krak lu., Muñoz de Escalona P., Dyomina I., Development of an intelligent robotic system for plasma processing of industrial products with complex shape // *11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. – 2021. – Pp. 572-579. – DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660960.
  7. Alontseva D.L., Ghassemieh E., Krasavin A.L., Shadrin G.K., Kussaiyn-Murat A.T., Kadyroldina A.T., Development of Control System for Robotic Surface Tracking // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. – 2020. – Vol. 9, No. 2. – Pp. 280-286. – DOI: 10.18178/ijmerr.9.2.280-286.
  8. Shadrin G. K., Alontseva D. L., Kussaiyn-Murat A. T., Kadyroldina A. T., Ospanov O.B., Haidegger T. Application of Compensation Algorithms to Control the Movement of a Robot Manipulator // *Acta Polytechnica Hungarica*. – 2020. – Vol. 17, No. 1. – Pp. 191-214. – DOI: 10.12700/APH.17.1.2020.1.1
  9. Saraf P., Ponnalagu R.N., Modeling and Simulation of a Point to Point Spherical Articulated Manipulator Using Optimal Control // *2021 7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*. – 2021. – Pp. 152-156. – DOI: 10.1109/ICARA51699.2021.9376496.
  10. Subedi D., Tyapin I., Hovland G., Dynamic Modeling of Planar Multi-Link Flexible Manipulators // *Robotics 2021*, 10(2), 70. – DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics10020070>.
  11. Yin H., Li Y., Li J., Decomposed dynamic control for a flexible robotic arm in consideration of nonlinearity and the effect of gravity // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 9(2). – Pp. 1-15. – DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814017694104>.
  12. Yang C., Wang X., Li Z., Li Y. and C.-Y. Su Teleoperation control based on combination of wave variable and neural networks // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. – 2017. – Vol. 47, no. 8. – Pp. 2125–2136.
  13. Ghozlane W., Knani J., NonLinear Control via Input-Output Feedback Linearization of a Robot Manipulator // *Advances in Science Technology and Engineering Systems Journal*. – 2018. – Vol. 3(5). – Pp. 374-381. – DOI: 10.25046/aj030543.
  14. Baccouch M., Dodds S., A Two-Link Robot Manipulator: Simulation and Control Design // *International Journal of Robotic Engineering*. – 2020. – Vol. 5(2). – Pp. 1-17. – DOI: 10.35840/2631-5106/4128.
  15. Iqbal J., Modern Control Laws for an Articulated Robotic Arm: Modeling and Simulation, *Engineering // Technology & Applied Science Research*. – 2019. – Vol. 9(2). – Pp. 4057-4061. – DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.2598>.
  16. El-Hadi Guechi, Bouzoualegh S., Zennir Y., Blažič S., MPC Control and LQ Optimal Control of A Two-Link Robot Arm: A Comparative Study // *Machines*. – 2018. – Vol. 6(3). – Pp. 2-14. – DOI:10.3390/machines6030037.
  17. Khurram Ali., Mehmood A., Muhammad I., Razzaq S., Iqbal J., Control of an Anthropomorphic Manipulator using LuGre Friction Model - Design and Experimental Validation // *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 67(9). – Pp. 401-410. – DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2021.7258>.
  18. David, I., Robles, G. PID Control Dynamics of A Robotics Arm Manipulator with Two Degrees of Freedom // *Control De Procesosy Robótica*. – Pp. 1-7. – Available online: <https://fr.slideshare.net/popochis/pidcontrol-dynamics-of-a-robotic-arm-manipulator-with-two-degrees-of-freedom> (accessed on 4 April 2017).
  19. Waqar A., Adeel M., Khurram A., Usman J., Soltan A., Jamshed I., Nonlinear Control of a Flexible Joint Robotic Manipulator with Experimental Validation // *Strojniški vestnik: Journal of Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 64(1). – Pp. 47-55. – DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2017.4786>.
  20. Iqbal J., Ullah M., G.Khan S., Khelifa B. and Ćuković S., Nonlinear control systems – A brief overview of historical and recent advances // *Nonlinear Engineering*. – 2017. – Vol. 6(4). – Pp. 301-312. – DOI: <https://doi.org/10.1515/nleng-2016-0077>.
- 
-