

УДК 621.01

doi:10.18720/SPBPU/2/id23-531

П.А. Андриенко¹, В.И. Каразин², Д.П. Козликин³, В.А. Терешин⁴,
А.В. Хисамов⁵, И.О. Хлебосолов⁶

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН



¹Павел Александрович Андриенко,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812) 297-4845, E-mail: andrienko-p@mail.ru



²Владимир Игоревич Каразин, д.т.н., профессор
Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 297-4845, E-mail: tmm-russia@mail.ru



³Денис Петрович Козликин, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел. +7 (812) 297-4845, E-mail: kozlikindenis@gmail.com



⁴Валерий Алексеевич Терешин,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)297-4845, E-mail: terva@mail.ru.



⁵Хисамов Андрей Владимирович,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)297-4845, E-mail: andrey@khis.ru.



⁶Игорь Олегович Хлебосолов, к.т.н., доцент
Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (812) 297-4845, E-mail: khlebosolov@mail.ru

Аннотация

Статья исследует применение нейронных сетей в решении задач теории механизмов и машин. В статье рассматриваются различные подходы и архитектуры нейронных сетей, применяемых в задачах теории механизмов и машин. Обсуждаются примеры применения нейронных сетей для структурного анализа, геометрического анализа, построения планов скоростей, систем уравнений положения механизма и других задач. Статья заключается с выводом о перспективах применения нейронных сетей в теории механизмов и машин, включая улучшение производительности и эффективности механизмов, а также создание новых и инновационных решений в области машиностроения и автоматизации.

Ключевые слова: Нейронные сети, Машинное обучение, Теория механизмов и машин, Кинематика, Динамика, Автоматизация, Структурный анализ, Геометрический анализ, План скоростей, Проектирование механизмов.

Введение

В последнее десятилетие нейронные сети получили широкое распространение и применение во многих областях, включая обработку изображений, распознавание речи, естественный язык и многое другое [1]. Однако их потенциал не ограничивается только этими областями. В последнее время нейронные сети также стали применяться для решения инженерных задач и задач фундаментальной науки [2].

В течение многих десятилетий исследователи в области механики стремились разработать методы и алгоритмы, позволяющие эффективно моделировать и анализировать сложные механические системы. Однако многие традиционные подходы ограничены своими возможностями в решении задач, требующих адаптивности, самообучения и способности работать с большим объемом данных.

Применение нейронных сетей в теории механизмов и машин представляет собой новую и захватывающую возможность для автоматизации проектирования, оптимизации и управления

механическими системами. Нейронные сети могут эффективно обучаться на больших объемах данных, извлекать сложные зависимости и выявлять скрытые закономерности в работе механизмов. Это позволяет решать задачи, которые традиционно считались сложными или трудоемкими для аналитического подхода.

В этом контексте нейронные сети, основанные на принципах машинного обучения, предоставляют новые возможности для решения задач теории механизмов и машин. Нейронные сети - это компьютерные модели, которые имитируют работу человеческого мозга и способны обучаться на основе опыта и данных. Они состоят из множества взаимосвязанных нейронов, которые обрабатывают информацию и принимают решения на основе полученных данных [3].

В данной статье мы рассмотрим различные аспекты применения нейронных сетей в теории механизмов и машин. Мы обсудим методы обучения нейронных сетей на данных о механических системах, архитектуры сетей, специально разработанные для решения задач данной области, а также их интеграцию с другими методами и алгоритмами.

Использование нейронных сетей в теории механизмов и машин представляет большой потенциал для развития этой области и создания новых инновационных решений. Это может привести к разработке более эффективных и устойчивых механических систем, улучшению процессов проектирования и сокращению времени разработки. Поэтому изучение и применение нейронных сетей в контексте теории механизмов и машин является актуальной и важной задачей, которая будет рассмотрена в данной статье.

Решаемые задачи

Фактически, применение нейронных сетей возможно для решения почти любых задач ТММ. Нейронные сети представляют собой мощный инструмент для решения различных инженерных задач, но не обязательно все задачи можно решить исключительно с их помощью. Возможность решения конкретной инженерной задачи с использованием нейронных сетей зависит от нескольких факторов:

1. **Доступность и объем данных:** нейронные сети требуют большого объема данных для обучения. Если у вас есть достаточное количество подходящих данных для обучения модели, то вероятность успешного решения задачи с помощью нейронных сетей будет выше. Однако, если данных недостаточно или они неподходящие, то нейронные сети могут столкнуться с ограничениями.

2. **Сложность задачи:** нейронные сети могут успешно решать задачи с разной степенью сложности. Однако, для некоторых задач требуется

высокая точность и надежность, которые могут быть достигнуты только с применением более традиционных методов.

3. Доступность экспертных знаний: в некоторых инженерных задачах необходимо использовать экспертные знания и правила, которые могут быть сложно представить в виде нейронной сети. В таких случаях может потребоваться комбинированное решение, объединяющее нейронные сети с традиционными методами.

4. Вычислительные ресурсы: обучение и использование нейронных сетей требуют значительных вычислительных ресурсов, включая высокопроизводительные процессоры и графические ускорители. Если у вас ограничены ресурсы, то может быть сложно применять нейронные сети для решения сложных задач.

В целом, нейронные сети предоставляют мощный инструмент для решения множества инженерных задач. Однако, каждая задача требует индивидуального подхода, и иногда может потребоваться комбинация различных методов и техник для достижения оптимального решения.

Для некоторых задач вполне допустимо использовать универсальные нейронные сети, а для некоторых потребуется создание индивидуальной нейронной сети. Рассмотрим различные задачи ТММ [4], которые можно решить с помощью нейронных сетей.

Структурный анализ механизма

Нейронные сети предлагают уникальные способы решения задач структурного анализа в теории механизмов и машин. Они позволяют автоматически анализировать и классифицировать сложные механические структуры, идентифицировать их компоненты и определить связи между ними.

Одним из способов, которым нейронные сети могут решить задачу структурного анализа в теории механизмов и машин, является применение сверточных нейронных сетей (Convolutional Neural Networks, CNN) [5].

Сверточные нейронные сети обладают способностью эффективно обрабатывать и анализировать данные с пространственной структурой, что делает их идеальным инструментом для анализа механических систем. В контексте теории механизмов и машин, где структура системы играет важную роль, сверточные нейронные сети могут быть использованы для автоматического обнаружения и анализа различных элементов и компонентов механических систем.

При использовании сверточных нейронных сетей для структурного анализа механизмов и машин, входные данные могут представляться в виде изображений или трехмерных моделей. Например, для анализа и классификации различных типов механизмов, нейронная сеть может быть

обучена на большой базе данных изображений, содержащих представления различных механических систем. Нейронная сеть будет изучать особенности и закономерности визуального представления каждого типа механизма и на основе этого делать предсказания о типе и структуре неизвестных механизмов.

Кроме того, сверточные нейронные сети могут применяться для анализа трехмерных моделей механических систем. Это особенно полезно в случаях, когда анализируются сложные системы с большим числом компонентов и соединений. Нейронные сети могут изучать особенности геометрической структуры механических систем и на основе этого делать выводы о их функциональности и эффективности.

Например, если у нас есть набор изображений механических деталей или сборок, CNN может быть обучена распознавать эти детали и определять их положение относительно друг друга. Это позволяет автоматически анализировать сложные структуры и создавать модели, основанные на их компонентах.

Таким образом, применение сверточных нейронных сетей в задаче структурного анализа в теории механизмов и машин позволяет автоматизировать процесс обнаружения и классификации элементов и компонентов механических систем. Это обеспечивает более быстрый и точный анализ, а также может служить основой для разработки новых методов оптимизации и проектирования механических систем.

Кроме того, также могут быть использованы рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Networks, RNN) [6]. RNN имеют способность учитывать контекстную информацию и последовательности данных. В случае структурного анализа, RNN могут использоваться для анализа последовательности компонентов механизма.

Применение нейронных сетей в структурном анализе также может включать комбинацию различных типов нейронных сетей, например, сочетание CNN и RNN. Это позволяет учитывать как пространственную структуру, так и последовательность компонентов в механической системе, что способствует правильному анализу и классификации.

Для построения готовой модели можно добавить в комбинацию сетей третий вид - графовые нейронные сети (Graph neural networks, GNN) [7].

В целом, нейронные сети предлагают новые возможности для решения задач структурного анализа в теории механизмов и машин. Их способность автоматического обучения и анализа данных позволяет эффективно обрабатывать сложные структуры, анализ которых человеком потребует больших временных затрат.

Геометрический анализ механизма

При выполнении геометрического анализа механизма в целом используется тот же подход, что и при выполнении структурного анализа. Но есть особенности обучения сети в соответствии с задачей.

Поскольку выполнение геометрического анализа может быть выполнено как аналитическим, так и графо-аналитическим методом, нейронные сети будут отличаться. Фактически, несмотря на общий результат, с точки зрения построения сети – это абсолютно разные задачи.

Рассмотрим графо-аналитический метод. Нейронная сеть для построения плана положений механизма будет выполнять следующие действия:

1. Поступление входных данных: на вход нейронной сети подаются данные о механизме, такие как длины звеньев, углы поворота, геометрические характеристики и другие параметры.

2. Обработка входных данных: нейронная сеть анализирует входные данные и производит их предварительную обработку. Это может включать масштабирование, нормализацию или другие преобразования данных, чтобы обеспечить их совместимость с внутренней структурой сети.

3. Прохождение через слои нейронной сети: Обработанные входные данные проходят через слои нейронной сети. Каждый слой состоит из нейронов, которые вычисляют взвешенную сумму входных сигналов и применяют активационную функцию для получения выхода. Процесс прохождения данных через слои повторяется для всех слоев в сети.

4. Генерация плана положений механизма: на выходе нейронной сети генерируются предсказания или рекомендации для плана положений механизма. Это может быть представлено в виде координат, углов поворота или других параметров, определяющих желаемое положение механизма.

5. Оценка и оптимизация: сгенерированный план положений механизма может быть оценен на соответствие заданным требованиям или критериям. Если план не соответствует требованиям, нейронная сеть может быть дообучена или модифицирована для улучшения результатов.

Применение нейронных сетей для геометрического анализа аналитическим методом является более сложной задачей и требует больше ручного контроля оператором. Нейронная сеть может хорошо решать системы уравнений для получения результата. Но нейронная сеть может с ошибкой построить эти системы уравнений.

Для построения системы уравнений можно использовать рекуррентную нейронную сеть (Recurrent neural network, RNN) [8] или любую другую архитектуру, способную обрабатывать последовательности данных. Обучение такой сети может быть выполнено с использованием

алгоритма обратного распространения ошибки и методов оптимизации, таких как стохастический градиентный спуск или его модификации.

Нейронная сеть для создания системы уравнений, описывающей механизм, будет выполнять следующие действия:

1. Генерация случайных уравнений: на первом этапе нейронная сеть может генерировать случайные уравнения, которые могут быть потенциально применимы для описания механизма. Это может включать различные математические операции, функции и параметры, которые связаны с механизмом.

2. Оценка сгенерированных уравнений: сгенерированные уравнения подвергаются оценке и проверке на соответствие требуемым условиям или критериям. Например, это может включать проверку на соответствие уравнениям Ньютона, законам сохранения энергии или другим фундаментальным принципам механики.

3. Обучение на основе обратной связи: нейронная сеть может использовать обратную связь для оценки качества сгенерированных уравнений и внесения коррекций. Это может быть выполнено путем сравнения результатов, полученных с помощью сгенерированных уравнений, с экспертными данными или известными моделями механизма. На основе этой обратной связи сеть может обновлять свои параметры и улучшать качество генерируемых уравнений.

4. Итеративный процесс генерации и оценки: Генерация и оценка уравнений могут выполняться в цикле, позволяя нейронной сети постепенно улучшать сгенерированные уравнения на основе обратной связи и опыта. Этот итеративный процесс может продолжаться до тех пор, пока не будет достигнуто желаемое качество системы уравнений.

Важно отметить, что процесс придумывания системы уравнений механизма с использованием нейронной сети может требовать большого количества данных, экспертных знаний и компьютерных ресурсов. Это сложная задача, и точность результатов будет зависеть от качества обучающих данных и архитектуры нейронной сети.

Решение полученной системы уравнений является более простой задачей, нежели ее создание. Тем не менее сам подход к работе нейронной сети говорит о том, что ответ будет угадан, а не получен в ходе решения. Следовательно, возможно возникновение неверных решений. Требуется наличие проверочного контура.

Кинематический и динамический анализ

Принципиально подход в построении нейронных сетей для кинематического и динамического анализа по сравнению с сетями для

геометрического анализа не будет отличаться. Тем не менее в деталях эти сети будут отличны. Вот несколько основных различий:

1. Входные данные: в случае геометрического анализа, входными данными для нейронной сети могут быть координаты или параметры, описывающие геометрическую структуру механизма. В кинематическом анализе, входными данными будут скорости и ускорения компонентов механизма. В динамическом анализе, входными данными могут быть массы, силы, моменты и другие параметры, влияющие на динамику механизма [9].

2. Целевая функция: в геометрическом анализе нейронная сеть может использоваться для предсказания положений компонентов механизма в пространстве. В кинематическом анализе, целью может быть предсказание скоростей и ускорений компонентов механизма. В динамическом анализе, целью может быть предсказание сил и моментов, действующих на компоненты механизма.

3. Архитектура сети: в зависимости от задачи анализа, архитектура нейронной сети может различаться. Например, для геометрического анализа может использоваться сверточная нейронная сеть, способная обрабатывать изображения или трехмерные данные. В кинематическом и динамическом анализе механизмов, могут применяться различные архитектуры, такие как рекуррентные нейронные сети или комбинация различных типов слоев для учета последовательности и зависимостей между данными.

4. Обучающие данные: для эффективного обучения нейронной сети в задачах кинематического и динамического анализа механизмов может потребоваться большое количество данных, содержащих информацию о положениях, скоростях, ускорениях, силах и моментах механизма. В геометрическом анализе, данные могут быть в виде изображений или геометрических параметров.

Нейронная сеть может быть использована для графического построения плана скоростей механизма. Для реализации такого подхода, можно использовать нейронную сеть, которая принимает на вход параметры механизма и генерирует соответствующий план скоростей в виде графика. Нейронная сеть может быть обучена на большом наборе данных, содержащих входные параметры механизма и соответствующие графические представления планов скоростей.

При обучении сети, важно предоставить ей данные, которые содержат информацию о требуемых движениях и особенностях конкретного механизма. Это может включать данные о желаемом траектории движения, ограничениях на скорости или ускорения, а также другие факторы, влияющие на план скоростей.

После обучения, нейронная сеть сможет принимать входные параметры механизма и генерировать соответствующий графический план скоростей. Это позволит инженерам и проектировщикам легко визуализировать и анализировать планы скоростей механизма, что поможет в принятии обоснованных решений и оптимизации работы механизма.

Однако, для успешного применения нейронных сетей в графическом построении плана скоростей, необходимо иметь достаточное количество качественных обучающих данных, а также тщательно подобрать архитектуру и параметры сети для достижения требуемых результатов.

Практическая реализация

На данный момент, в силу ограничений текущих моделей нейронных сетей, не существует такой нейронной сети, которой можно просто "прочитать" учебник в полном смысле этого слова. Нейронные сети, такие как модель GPT (Generative Pre-trained Transformer), способны обрабатывать и генерировать тексты, но их способности понимания текста ограничены.

Современные модели нейронных сетей могут быть обучены на большом количестве текстовых данных и способны предсказывать продолжение предложений или генерировать тексты на основе контекста. Однако, у них нет понимания смысла прочитанного текста на уровне человеческого понимания.

«Прочитать учебник» включает в себя осмысление содержания, усвоение информации, выделение ключевых понятий и связей между ними, анализ и рефлексию. Это требует глубокого понимания и интеллектуальных способностей, которые на данный момент не могут быть полностью воспроизведены нейронными сетями.

Однако, с помощью нейронных сетей можно выполнять определенные задачи в обработке текста, такие как автоматическое реферирование, извлечение ключевых фактов, классификация текстов и машинный перевод. Эти инструменты могут быть полезными для работы с учебными материалами, но не заменяют полноценное чтение и понимание текста.

Если взять нейронную сеть, заточенную на поиск определенной информации в тексте можно реализовать полуавтоматическое обучение по найденным фрагментам. В рамках данной работы была предпринята попытка «обучить» готовую нейронную сеть с модулем текстовой обработки на основе учебника теории механизмов и машин [10]. Запуск производился на компьютере с процессором Apple M1 Pro и 16 Гб оперативной памяти. Для накопления информации сетью был установлен лимит в 280 Гб. По завершению обработки информации нейронная сеть

правильно выдавала определения терминов. Могла объяснить значения «своими словами», могла описать алгоритм решения той или иной задачи, но не могла самостоятельно решить задачу, в том числе взятую из примеров учебника. При этом если спросить не решение задачи, а только ответ, сеть отвечала на вопрос. В большинстве случаев ответы на примеры, отсутствующие в учебнике, были неверными. На примеры, встречающиеся в учебнике, большинство ответов были верные.

Для решения задачи структурного анализа была написана нейронная сеть на базе TensorFlow. Сеть обучалась на подготовленном документе, в котором последовательно приводились различные виды звеньев механизма, кинематические пары и готовые схемы механизмов, взятые из учебных пособий [11-17]. Поскольку модуль Tensorflow Object Detection определяет объекты на изображении достаточно хорошо, а вариации схематичного изображения отдельных звеньев – конечны, полученная сеть определяла структуру механизма без ошибок. Графический модуль для визуального отображения результата не был подключен. Граф механизма отображался в виде табличных данных со списком зависимостей каждого звена. Для определения числа степеней подвижности использовался алгоритмический модуль, который по выходным данным нейронной сети (число звеньев и степень подвижности каждой кинематической пары) производил нудные подсчеты. Это давало точный результат и не требовало больших вычислительных ресурсов, которые потребовались бы для нахождения ответа нейронной сетью.

Заключение.

Применение нейронных сетей в решении задач теории механизмов и машин представляет собой важную и перспективную область исследований. Нейронные сети имеют потенциал для автоматизации и оптимизации процессов анализа и проектирования механизмов, а также для обнаружения новых решений и улучшения существующих.

Одним из основных преимуществ применения нейронных сетей является их способность обрабатывать большие объемы данных и извлекать скрытые зависимости. С помощью обучения на разнообразных наборах данных, нейронные сети могут находить оптимальные параметры и структуры механизмов, решать сложные задачи кинематики и динамики, а также предсказывать и оптимизировать их работу.

Однако, следует отметить, что успешное применение нейронных сетей в задачах теории механизмов и машин требует качественных и разнообразных данных для обучения, а также тщательного подхода к выбору и настройке архитектуры сети. Кроме того, интерпретируемость

результатов и объяснимость принимаемых решений остаются актуальными вопросами, требующими дальнейших исследований.

В целом, применение нейронных сетей в теории механизмов и машин открывает новые возможности для автоматизации и оптимизации процессов проектирования, анализа и управления механизмами. Это может привести к улучшению производительности, надежности и эффективности механизмов, а также созданию новых и инновационных решений в области машиностроения и автоматизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kaito Watanabe, Kotaro Sakamoto, Ryo Karakida, Sho Sonoda, Shun-ichi Amari. Deep learning in random neural fields: Numerical experiments via neural tangent kernel. 2023, Neural Networks, №160. С. 148-163.
- [2] Jiejie Chen, Boshan Chen, Zhigang Zeng. Basic theorem and global exponential stability of differential–algebraic neural networks with delay. 2021, Neural Networks, №140. С. 336-343.
- [3] Hyung-II Kim, Seok Bong Yoo. Trends in Super-High-Definition Imaging Techniques Based on Deep Neural Networks. Mathematics 2020, 8, 1907. <https://doi.org/10.3390/math8111907>
- [4] Андриенко П.А., Козликин Д.П. Теория механизмов и машин. Структурный, геометрический и кинематический анализ механизмов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019.-27 с.
- [5] James L. Crowley. Convolutional Neural Networks. 2023. Human-Centered Artificial Intelligence. С. 67-80
- [6] Samit Ahlawat. Recurrent Neural Networks. 2022. Reinforcement Learning for Finance, С. 177-232.
- [7] Anna Boronina, Vladimir Maksimenko, A. E. Hramov. Convolutional Neural Network Outperforms Graph Neural Network on the Spatially Variant Graph Data. Mathematics. 2023, 11
- [8] Mohsen Shahandashti, Bahram Abediniangerabi, Ehsan Zahed, Sooin Kim. Construction Forecasting Using Recurrent Neural Networks. 2023. Construction Analytics. С. 75–94
- [9] Ю. А. Семенов, Н. С. Семенова. Теория механизмов и машин в примерах и задачах. 2015. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2015
- [10] Евграфов А.Н. Теория механизмов и машин: учебник / А.Н.Евграфов, М.З.Коловский, Г.Н.Петров. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020.
- [11] Ю. А. Семенов, Н. С. Семенова. Введение в механику машин. Структура и кинематика механизмов: учебное пособие. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023

- [12] Евграфов А.Н., Семенов Ю.А., Семенова Н.С. Проектирование цикловой машины в курсе ТММ. Санкт-Петербург, 2021.
- [13] Семенов Ю.А., Семенова Н.С. Геометрический анализ плоских рычажных механизмов. Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. № 3. С. 157-167.
- [14] Хростицкий А.А., Евграфов А.Н., Терёшин В.А. Геометрия и кинематика пространственного шестизвенника с избыточными связями. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 2 (123). С. 170-176.
- [15] Andrienko P.A., Evgrafov A.N., Kozlikin D.P., Semenov Y.A., Semenova N.S. Graph-based structural analysis of kinetic art mechanisms on the example of a moving horse mechanism. Mechanisms and Machine Science (book series). 2022. Т. 108 MMS. С. 141-149.
- [16] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V., Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer-Verlag Heidelberg New York, 2000, P. 394.
- [17] Semenov Y.A., Semenova N.S. Features geometric analysis of planar mechanisms. International Review of Mechanical Engineering. 2018. Т. 12. № 5. С. 430-436.

P.A. Andrienko, V.I. Karazin, D.P. Kozlikin, V.A. Ter shin,
A.V. Khisamov, I.O. Khlebosolov

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR SOLVING PROBLEMS IN THE THEORY OF MECHANISMS AND MACHINES

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Abstract

The article explores the application of neural networks in solving problems of mechanism and machine theory. The article considers different approaches and architectures of neural networks used in problems of mechanism and machine theory. Examples of neural networks application for structural analysis, geometrical analysis, construction of velocity plans, systems of equations of mechanism position and other problems are discussed. The article concludes with the prospects of applying neural networks in the theory of mechanisms and machines, including the improvement of performance and efficiency of

mechanisms, as well as the creation of new and innovative solutions in the field of mechanical engineering and automation.

Key words: Neural Networks, Machine Learning, Mechanism and Machine Theory, Kinematics, Dynamics, Automation, Structural Analysis, Geometric Analysis, Speed Plan, Mechanism Design.

REFERENCES

- [1] Kaito Watanabe, Kotaro Sakamoto, Ryo Karakida, Sho Sonoda, Shun-ichi Amari. Deep learning in random neural fields: Numerical experiments via neural tangent kernel. 2023, Neural Networks, №160. pp. 148-163.
- [2] Jiejie Chen, Boshan Chen, Zhigang Zeng. Basic theorem and global exponential stability of differential–algebraic neural networks with delay. 2021, Neural Networks, №140. pp. 336-343.
- [3] Hyung-II Kim, Seok Bong Yoo. Trends in Super-High-Definition Imaging Techniques Based on Deep Neural Networks. Mathematics 2020, 8, 1907. <https://doi.org/10.3390/math8111907>
- [4] Andrienko P.A., Kozlikin D.P. Teoriya mexanizmov i mashin. Strukturny`j, geometricheskij i kinematicheskij analiz mexanizmov. -- SPb.: Izd-vo Politekn. un-ta, 2019.-27 s.
- [5] James L. Crowley. Convolutional Neural Networks. 2023. Human-Centered Artificial Intelligence. C. 67-80
- [6] Samit Ahlawat. Recurrent Neural Networks. 2022. Reinforcement Learning for Finance, C. 177-232.
- [7] Anna Boronina, Vladimir Maksimenko, A. E. Hramov. Convolutional Neural Network Outperforms Graph Neural Network on the Spatially Variant Graph Data. Mathematics. 2023, 11
- [8] Mohsen Shahandashti, Bahram Abediniangerabi, Ehsan Zahed, Sooin Kim. Construction Forecasting Using Recurrent Neural Networks. 2023. Construction Analytics. C. 75–94
- [9] Semenov Y.A., Semenova N.S. Teoriya mekhanizmov i mashin v primerah i zadachah. SPb.: Izd-vo Politekn. un-ta, 2015
- [10] Evgrafov A.N. Teoriya mexanizmov i mashin : uchebnik / A.N.Evgrafov, M.Z.Kolovskij, G.N.Petrov. – SPb.: POLITEX-PRESS, 2020. – 248 s.
- [11] Semenov Y.A., Semenova N.S. Vvedenie v mehaniku mashin. Struktura I kinematika mekhanizmov: uchebnoe posobie. SPb: POLITECH-PRESS, 2023
- [12] Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Semenova N.S. Proektirovanie ciklovoj mashiny` v kurse TMM. Sankt-Peterburg, 2021.
- [13] Semenov Yu.A., Semenova N.S. Geometricheskij analiz ploskix ry`chazhny`x mexanizmov. Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie. 2013. № 3. Pp. 157-167.

- [14] Hrostitskii A.A., Evgrafov A.N., Tereshin V.A. Geometry and kinematics of a spatial hexahedral with redundant links. Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State Polytechnical University. 2011. № 2 (123). Pp. 170-176.
- [15] Andrienko P.A., Evgrafov A.N., Kozlikin D.P., Semenov Y.A., Semenova N.S. Graph-based structural analysis of kinetic art mechanisms on the example of a moving horse mechanism. Mechanisms and Machine Science (book series). 2022. T. 108 MMS. Pp. 141-149.
- [16] Kolovsky M.Z., Evgrafov A.N., Semenov Yu.A., Slousch A.V., Advanced Theory of Mechanisms and Machines. Springer-Verlag Heidelberg New York, 2000, P. 394.
- [17] Semenov Y.A., Semenova N.S. Features geometric analysis of planar mechanisms. International Review of Mechanical Engineering. 2018. T. 12. № 5. Pp. 430-436.