Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ   
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра \_\_КСУП\_\_\_\_\_

**Визуальное моделипование нейронных сетей в конструкторе вычислительного эксперимента СМ МАРС**

**ОТЧЕТ**

ПО РЕЗУЛЬТАТАМ

\_\_\_\_\_\_Производственной \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ практики: \_\_\_\_Преддипломной\_\_\_\_\_\_\_

(вид практики) (тип практики.)

|  |  |
| --- | --- |
|  | Обучающийся гр. \_583-М\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_Карабатов П.В\_\_\_  (подпись) (И.О. Фамилия)  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  (дата) |
| **\_\_\_\_\_\_\_\_\_**  (оценка)  М.П. | Руководитель практики от профильной организации:  \_\_ Доцент кафедры КСУП\_\_\_\_\_\_\_  (должность, ученая степень, звание)  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_Кочергин М.И\_\_  (подпись) (И.О. Фамилия)  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  (дата) |
| **\_\_\_\_\_\_\_\_\_**  (оценка) | Руководитель практики от Университета:  Профессор кафедры КСУП, д.т.н, профессор\_\_\_\_\_\_\_  (должность, ученая степень, звание)  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_Шурыгин Ю.А\_\_  (подпись) (И.О. Фамилия)  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  (дата) |

Томск 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ   
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра \_\_\_КСУП\_\_\_\_\_\_\_\_\_

|  |  |
| --- | --- |
|  | УТВЕРЖДАЮ  Зав. кафедрой\_\_КСУП\_\_\_\_\_\_  \_\_Шурыгин Ю.А\_\_\_\_\_\_\_  (Ф.И.О.)  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  (подпись)  «\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2025 г. |

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

на \_\_\_\_Производственную\_\_\_\_\_\_ практику: \_\_Преддипломную\_\_\_\_\_

(вид практики) (тип практики)

студенту гр.583-М\_ \_\_ факультета вычислительных систем\_\_\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_Карабатову П.В\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(Ф.И.О студента)

1. Тема практики: Проектирование средств разработки нейронных сетей в СМ МАРС
2. Цель практики: Получение профессиональных умений и опыта профессиональной деятельности
3. Сроки прохождения практики:24.03.2025-17.05.2025

**Совместный рабочий график (план) проведения практики**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № п/п | Перечень заданий | Сроки выполнения |
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |
| 4 |  |  |

Дата выдачи: «\_24\_» \_Марта\_\_\_ 2025 г.

Руководитель практики от университета

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| \_Профессор кафедры КСУП\_\_\_\_  (должность) | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  (Подпись) | \_\_\_ Шурыгин Ю.А \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  (Ф.И.О.) |

Согласовано:

Руководитель практики от профильной организации

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| \_Доцент кафедры КСУП\_\_\_\_  (должность) | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  (Подпись)  М.П. | \_\_\_ Кочергин М.И \_\_\_\_\_\_\_  (Ф.И.О.) |

Задание принял к исполнению « 24 » \_\_Марта\_\_\_\_ 2025г.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Студент гр.\_583-М\_\_\_\_ | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  (Подпись) | \_\_\_ Карабатов П.В \_\_\_\_\_\_\_  (Ф.И.О.) |

Содержание

[1 Введение 4](#_Toc196142518)

[2 Анализ предметной области 5](#_Toc196142519)

[2.1 Нейронные сети и машинное обучение 5](#_Toc196142520)

[2.2 Среда моделирования МАРС 8](#_Toc196142521)

[3 Обзор аналогов 12](#_Toc196142522)

[3.1 Deep Learning Toolbox 12](#_Toc196142523)

[3.2 NeuroGenetic Optimizer 16](#_Toc196142524)

[3.3 SimInTech 17](#_Toc196142525)

[4 Синтез портрета проектируемой системы 21](#_Toc196142526)

[4.1 Формулирование требований к проектируемой системе 21](#_Toc196142527)

[4.2 Обзор средств реализации 22](#_Toc196142528)

[4.3 Архитектура системы 27](#_Toc196142529)

[5 Работа с нейронными сетями в PyTorch 34](#_Toc196142530)

[5.1 Работа с нейронными сетями прямого распространения 35](#_Toc196142531)

[5.2 Работа с рекуррентными нейронными сетями 36](#_Toc196142532)

[5.3 Работа со сверточным нейронными сетями 47](#_Toc196142533)

[6 Реализация нейронных сетей для модулей системы 50](#_Toc196142534)

[6.1 Реализация моноблочных сетей 50](#_Toc196142535)

[6.2 Реализация многоблочных сетей 52](#_Toc196142536)

[Заключение 55](#_Toc196142537)

[Список использованных источников 57](#_Toc196142538)

## 1 Введение

Использование нейронных сетей позволяет автоматизировать множество рутинных процессов, часто связанных с распознаванием или прогнозированием, что в свою очередь позволяет использовать освободившееся время с большей пользой. Однако для каждого отдельного случая необходимо создание и обучение отдельной нейронной сети, поскольку эффективность машинного обучения напрямую зависит от выбранной модели и составленной обучающей выборки.

Проектирование нейронных сетей представляет собой непростой итерационный процесс выбора архитектуры сети, количества скрытых слоёв, нейронов в этих слоях, функций активации нейронов, методов оптимизации для обучения сети, метрик оценки качества и пр. Поэтому актуальным является разработка средств автоматизации проектирования нейронных сетей. Создание таких инструментов на базе систем компьютерного моделирования, позволит не только создавать и тренировать нейронные сети без необходимости программирования, но и интегрировать их в модели систем управления объектами, чьи модели построены в этих средах моделирования. Часто подобные программы работают по принципу визуального проектирования, поскольку слоённая организация современных нейронных сетей прекрасно перекладывается на подобную систему.

Среда моделирования МАРС предоставляет возможности визуального моделирования объектов и их систем управления, поэтому включение возможности разработки и использования нейронных сетей в СМ МАРС открывает множество возможностей по расширению сфер применения среды моделирования.

Целью данной работы является исследование возможностей интеграции методов машинного обучения в среду моделирования МАРС.

В рамках текущей работы предполагается создание первичного портрета среды визуального моделирования нейронных сетей на базе среды моделирования МАРС.

Для реализации данной задачи необходимо:

1. Изучить существующие аналоги на рынке и выявить их достоинства и недостатки;
2. Составить техническое задание;
3. Выбрать средства реализации.
4. Спроектировать систему

## 2 Анализ предметной области

### 2.1 Нейронные сети и машинное обучение

Нейронные сети [1] – это метод машинного обучения, при котором компьютерная программа работает по принципу человеческого мозга, используя различные нейронные связи. Если очень сильно упрощать, это человеческий мозг в миниатюре, только нейроны в нем искусственные и представляют собой вычислительные элементы, созданные по образу и подобию биологических нейронов.

Нейрон – это вычислительная единица, которая получает информацию, производит над ней простые вычисления и передает ее дальше. Они делятся на три основных типа: входной, скрытый и выходной. Также есть нейрон смещения и контекстный нейрон. В том случае, когда нейросеть состоит из большого количества нейронов, вводят термин слоя. Соответственно, есть входной слой, который получает информацию, n скрытых слоев (обычно их не больше 3), которые ее обрабатывают и выходной слой, который выводит результат.

У каждого из нейронов есть 2 основных параметра: входные данные (input data) и выходные данные (output data).

Синапс – это связь между двумя нейронами. У синапсов есть 1 параметр – вес. Благодаря ему, входная информация изменяется, когда передается от одного нейрона к другому. Допустим, есть 3 нейрона, которые передают информацию следующему. Тогда у нас есть 3 веса, соответствующие каждому из этих нейронов. У того нейрона, у которого вес будет больше, та информация и будет доминирующей в следующем нейроне (пример – смешение цветов).

Нейросеть является обучаемой системой и может быть самообучаемой. Она может обучаться как с помощью заданных человеком алгоритмов распознавания или команд, так и на основе прошлого опыта – то есть самостоятельно, используя ранее полученные данные.

Нейронные сети используются для решения сложных задач, которые требуют аналитических вычислений подобных тем, что делает человеческий мозг. Самыми распространенными задачами, успешно решаемыми с применением нейронных сетей являются:

1) Классификация – распределение объектов по классам. Например, на вход дается список пассажиров Титаника и нужно построить модель, предсказывающую спасётся пассажир или нет. Эту работу может сделать нейронная сеть, анализируя такую информацию как: возраст, класс, количество членов семьи на борту и т.д;

2) Предсказание – возможность предсказывать будущие значения показателя на основе прошлых. Например, рост или падение акций, основываясь на ситуации на фондовом рынке;

3) Распознавание – в настоящее время, самое широкое применение нейронных сетей. Используются для нахождения необходимого образа среди вводных данных.

Для каждой цели требуется свой подход. На сегодняшний день существует множество архитектур и подходов, которые максимизируют производительность нейронных сетей под конкретную задачу.

Наиболее распространённые типы нейронных сетей:

1. Перцептрон – это самый простой вид нейронной сети, который был разработан в 1957 году Фрэнком Розенблаттом. Он состоит из одного или нескольких нейронов, связанных между собой. Перцептрон применяется для решения задач бинарной классификации и может использоваться для создания логических операций;
2. Сверточные нейронные сети были разработаны для анализа и обработки изображений. Они используют сверточные слои для автоматического извлечения признаков из входных данных. CNN обычно применяются для задач распознавания образов, классификации изображений, детекции объектов и даже анализа видео;
3. Рекуррентные нейронные сети предназначены для работы с последовательными данными, такими как тексты, речь и временные ряды. Они имеют обратные связи между нейронами, что позволяет учитывать контекст и зависимости в данных. Однако классические RNN имеют проблему затухающего или взрывающегося градиента. Для решения этой проблемы были разработаны модификации, такие как LSTM (долгая краткосрочная память) и GRU (единицы с воротами);
4. LSTM – это вид рекуррентных нейронных сетей, специально разработанный для работы с долгосрочными зависимостями в данных. Они позволяют моделям учиться на длительных последовательностях и успешно применяются в задачах генерации текста, машинного перевода и анализа временных рядов;
5. Сети с архитектурой внимания позволяют моделировать взаимосвязи между элементами входных данных, уделяя особое внимание определенным частям. Они успешно применяются в машинном переводе, генерации текста и других задачах, где важно учесть контекст и взаимосвязи между элементами данных.

### 2.2 Среда моделирования МАРС

**Среда моделирования МАРС** (**М**оделирование и **А**втоматический **Р**асчёт **С**истем) [2] – универсальная программная система компьютерного моделирования, которая позволяет частично или полностью заменить физический эксперимент вычислительным, исследовать и оптимизировать характеристики создаваемых устройств или подсистем в поисках наилучшего варианта.

Основанная на предложенном профессором Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Дмитриевым Вячеславом Михайловичем методе компонентных цепей, система обладает широким набором режимов анализа, а адаптация к моделированию нового класса устройств осуществляется оперативно путем использования и расширения библиотеки моделей компонентов. При этом имеется возможность автоматизированной генерации новых моделей компонентов, что обеспечивает лёгкую и быструю расширяемость областей применения данной системы.

К возможностям среды можно отнести следующие:

1. Графический набор схемы;
2. многооконный пользовательский интерфейс;
3. просмотр и обработка результатов;
4. режим анализа цепи по постоянному току;
5. режим анализа цепи во временной области;
6. режим анализа цепи в частотной области;
7. моделирование как линейных, так и нелинейных цепей;
8. печать схемы и выходной информации, такой как графики, таблицы и т.д.;
9. возможность изменения параметров (номиналов) компонентов во время моделирования;
10. обширный набор компонентов от аналоговой до цифровой электротехники и электроники.

Интерфейс программы СМ МАРС представлен на рисунке 2.1.

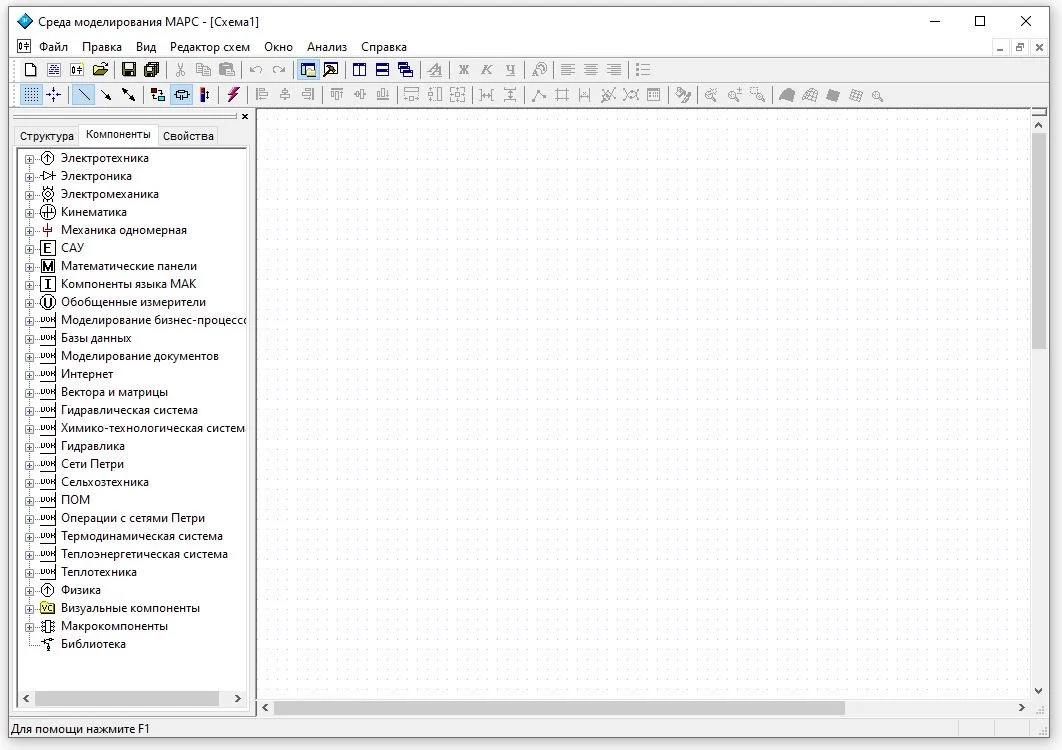


Рисунок 2.1 – Основное окно СМ МАРС

Пример визуальных компонентов СМ МАРС представлен на рисунке 2.2.

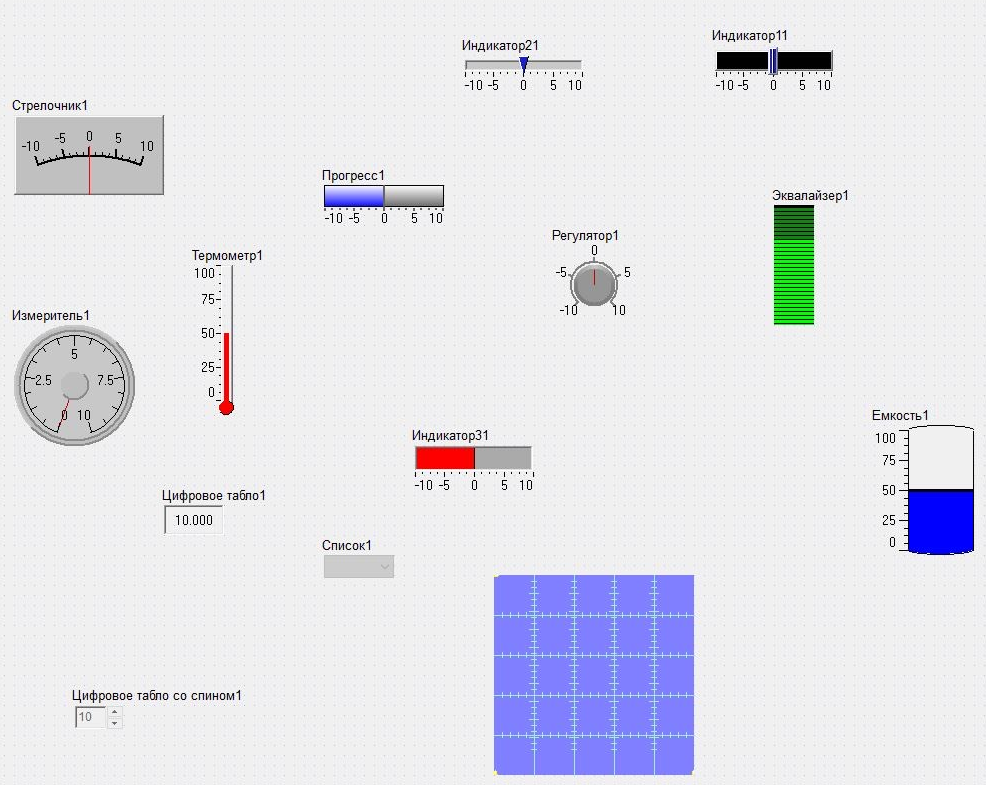


Рисунок 2.2 – Пример визуальных компонентов СМ МАРС

На базе среды моделирования МАРС реализован ряд виртуальных лабораторий. Универсальный аппарат моделирования среды МАРС позволяет создавать виртуальные учебно-исследовательские лаборатории практически по любой технической дисциплине. Лаборатории оснащены генераторами различных сигналов, полным набором измерительных приборов, включая осциллографы и анализаторы спектров, и обладают широкими возможностями в части обработки результатов вычислительного эксперимента.

Сферы применения среды моделирования МАРС:

1. Полупроводниковые приборы (более 10 различных полупроводниковых приборов);
2. Источники воздействий (открытый для пополнения набор источников, задаваемых математическим выражением);
3. Вольтамперные характеристики;
4. Моделирование электрических машин;
5. Моделирование электромагнитных элементов с разветвленной магнитной системой;
6. Электронное и функциональное моделирование систем автоматического управления;
7. Моделирование звеньев нелинейных систем автоматического управления;
8. Цифровые устройства;
9. Структурное моделирование электропривода.

## 3 Обзор аналогов

На рынке программ по созданию нейронных сетей существует огромное множество готовых решений от крупных информационных компаний. Благодаря разделению нейронных сетей на слои большая их часть использует блочную структуру, однако это не является единственно возможной архитектурой.

### 3.1 Deep Learning Toolbox

Deep Learning Toolbox [3] – сборник дополнений для среды математического моделирования Matlab, который обеспечивает основу для разработки и реализации глубоких нейронных сетей с алгоритмами, предварительно обученными моделями и приложениями.

Интерфейс программы представлен на рисунке 3.1.

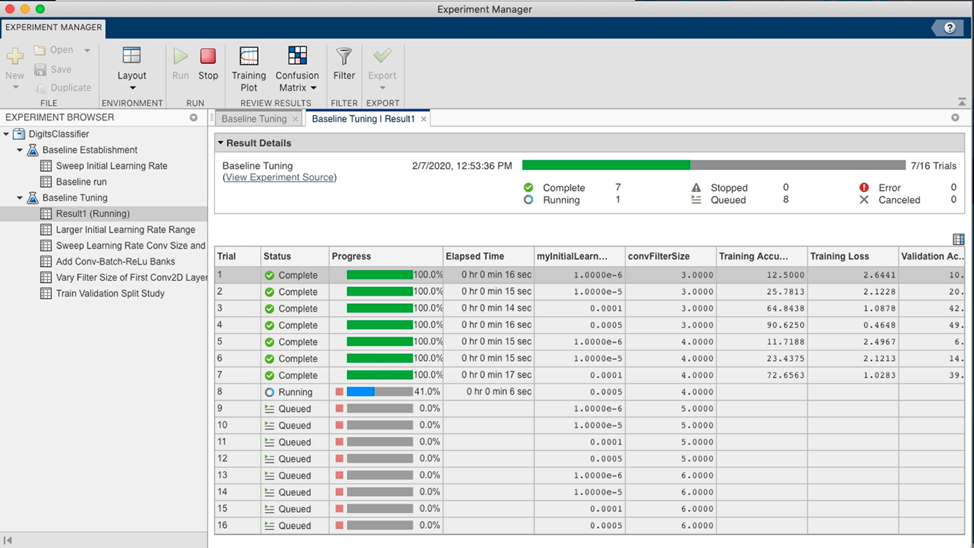


Рисунок 3.1 – Интерфейс Deep Learning Toolbox

#### 3.1.1 Deep Network Designer

Элемент Deep Network Designer [4] сборника Deep Learning Toolbox позволяет графически создавать, анализировать и тренировать модели нейронных сетей.

Интерфейс создания нейронных сетей в Deep Network Designer разделён на две части: Layer Library, библиотека слоёв из которых мы выбираем нужные нам и переносим в поле Designer, где на их базе уже создаётся нужная нам нейронная сеть.

Интерфейс программы представлен на рисунках 3.2, 3.3 и 3.4.

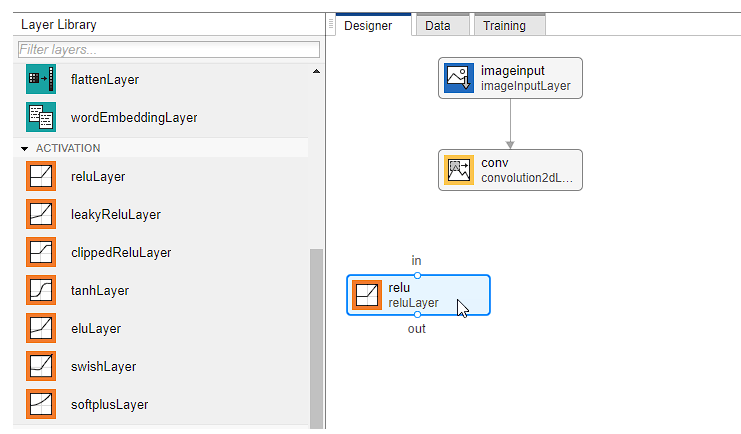


Рисунок 3.2 – Интерфейс Deep Learning Designer

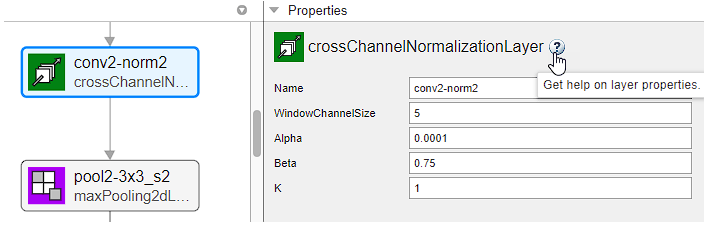


Рисунок 3.3 – Интерфейс настройки слоёв

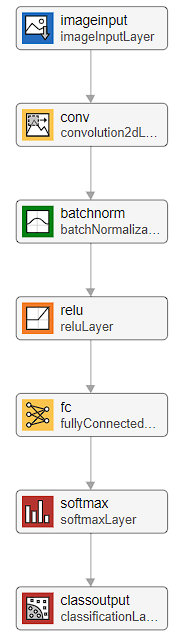


Рисунок 3.4 – Сверточная нейронная сеть

Кроме того, возможен вариант задания нейронной сети через код Matlab. Реализация сверточной нейронной сети аналогичной созданной при помощи модулей слоёв представлена на рисунке 3.5.

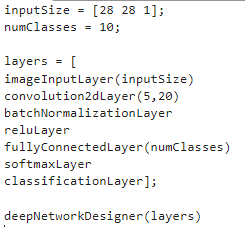


Рисунок 3.5 – Код для создания сверточной нейронной сети

Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что создание большинства видов нейронных сетей возможно в компоненте Deep Network Designer и многих других компонентах сборки Deep Learning Toolbox.

#### 3.1.2 Neural Fitting App

Приложение Neural Net Fitting [5] позволяет создавать, визуализировать и обучать двухслойную сеть с прямолинейным движением для решения задач подгонки данных.

Это условие мешает нам создавать рекуррентные и сверточные нейронные сети с использованием подгонки данных, что оставляет возможным лишь использованием нейронных сетей прямого распространения.

Интерфейс программы представлен на рисунке 3.6.

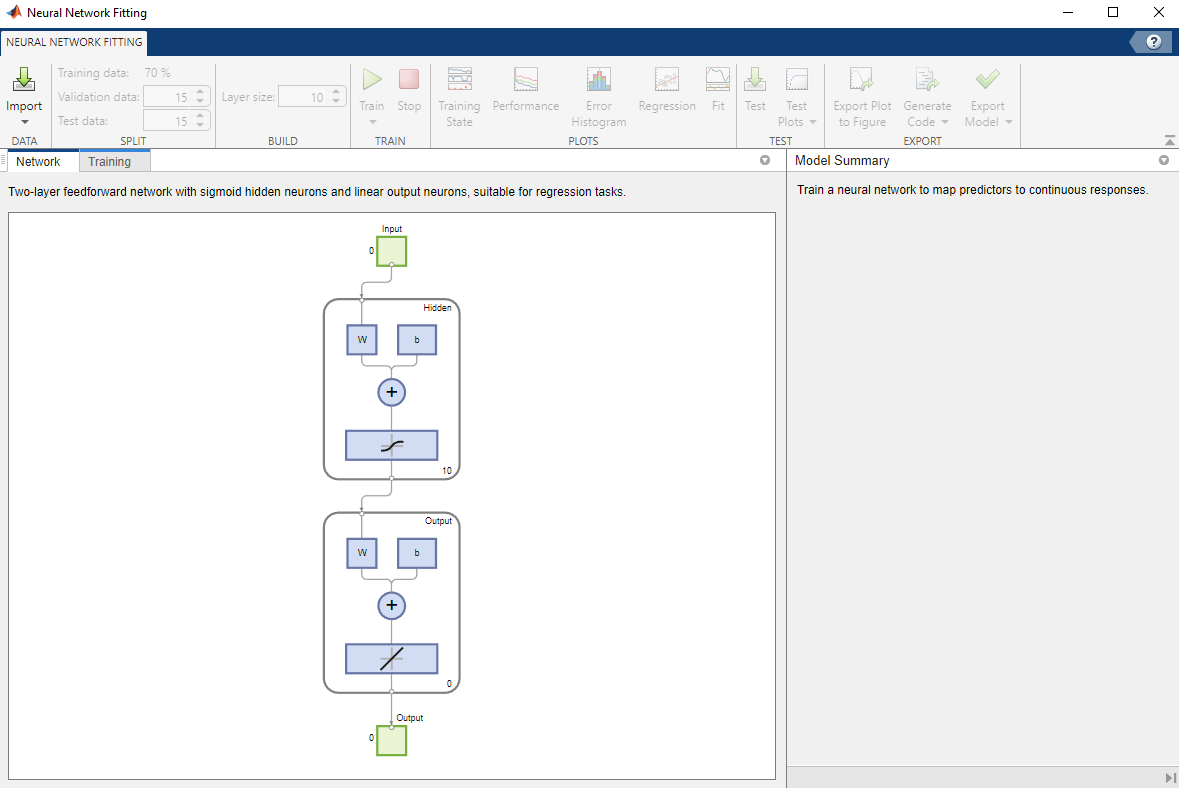


Рисунок 3.6 – Интерфейс программы Neural Fitting App

### 3.2 NeuroGenetic Optimizer

NeuroGenetic Optimizer [6] – это программа, созданная компанией BioComp Systems, которая автоматизирует проектирование и обучение нейронных сетей, осуществляя перебор комбинаций входных переменных, архитектур нейронных моделей, а также их внутренних структур для создания групп полностью обученных высокоэффективных надежных моделей, которые прогнозируют то, что требуется. По заверениям разработчиков эта программа специализирована на моделировании временных рядов.

В процессе поиска NeuroGenetic Optimizer разбивает данные на 3 массива данных;

1. Моделирование: используется для выполнения регрессии;
2. Оптимизация: используется для оценки альтернативных моделей и определения того, когда следует прекратить обучение модели;
3. Отбор: для выбора моделей, которые следует сохранить и представить в "ансамбле" или наборе.

Эти наборы данных извлекаются последовательно, случайным образом или случайно с проверкой на сходство, чтобы обеспечить соответствующую выборку для построения модели. Использование регрессии с "ранней остановкой" и двойной валидацией, а также поиск согласованности по всем трем наборам данных позволяет создавать модели, обладающие повышенной надежностью.

Интерфейс программы представлен на рисунке 3.7.

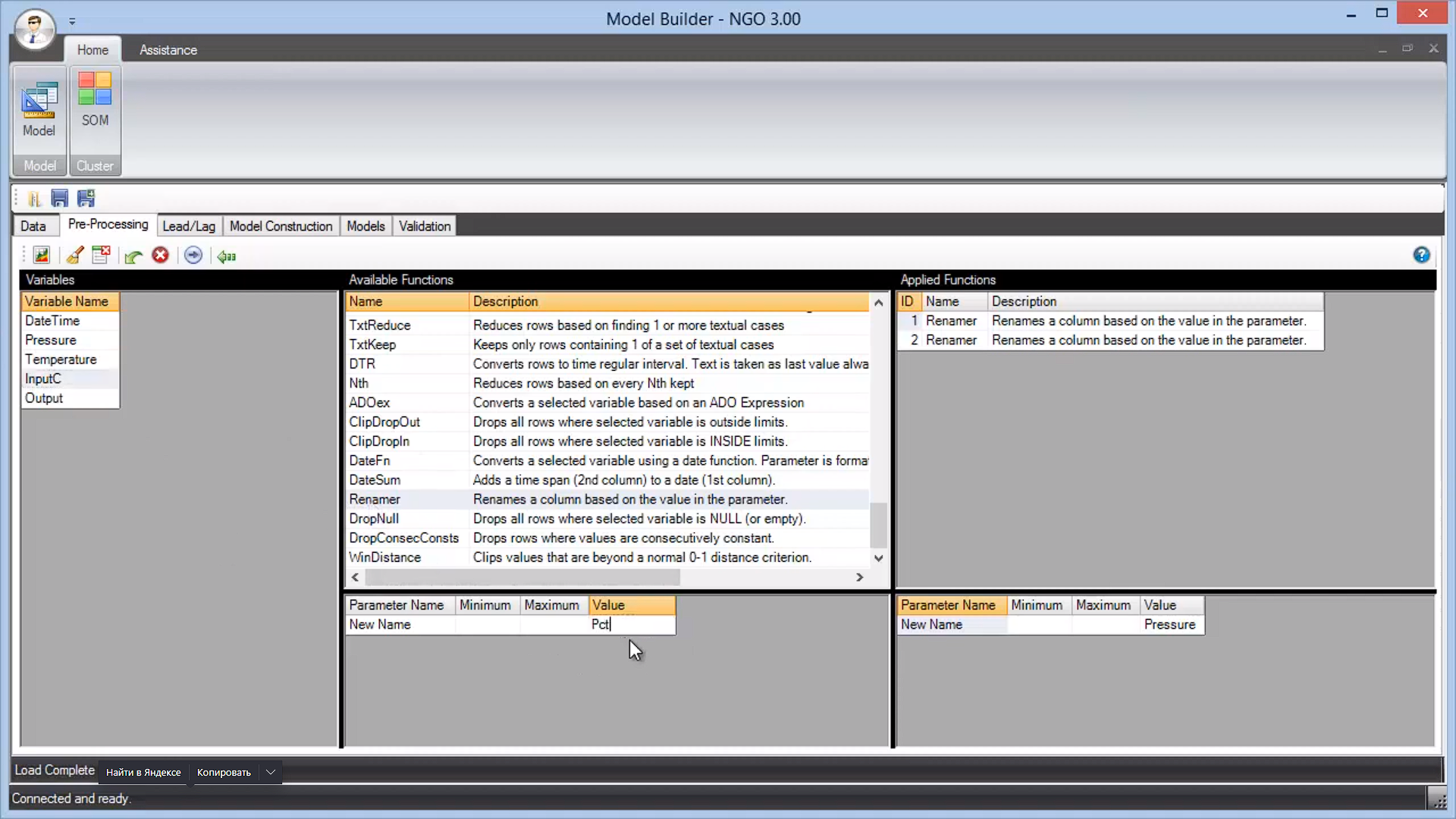


Рисунок 3.7 – Интерфейс программы Neurogenetic Optimizer

### 3.3 SimInTech

SimInTech(от Simulation in Tech) [7] **-** среда разработки математических моделей, алгоритмов управления, интерфейсов управления и автоматической генерации кода для контроллеров управления и графических дисплеев .

Программа SimInTech предназначена для детального исследования и анализа нестационарных процессов в ядерных и тепловых энергоустановках, в системах автоматического управления, в следящих приводах и роботах, и в любых технических системах, описание динамики которых может быть представлено в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений и/или реализовано методами структурного моделирования. Основными направлениями использования SimInTech являются создание моделей, проектирование алгоритмов управления, их отладка на модели объекта, генерация исходного кода на языке Си для программируемых контроллеров.

Создание нейронных сетей в среде SimInTech работает по принципу модульного строительства. Пользователь выбирает доступные модули и соединяет их при помощи графического интерфейса без взаимодействия с кодом самих модулей.

На данный момент в SimInTech доступны следующие модули по построению нейронных сетей:

1. Входной слой: Компонент представляет собой входной слой нейронной сети (НС). Этот компонент создает НС и производит первичную обработку входных данных;
2. Полносвязный слой: Компонент представляет собой полносвязный слой нейронной сети (НС);
3. Сверточный слой: Компонент представляет собой сверточный слой нейронной сети (НС);
4. Антисверточный слой: Компонент представляет собой антисверточный слой нейронной сети (НС);
5. Слой объединения: Компонент представляет собой субдискретизирующий слой нейронной сети (НС);
6. Слой cцепления: Компонент представляет собой слой нейронной сети (НС), сцепляющий несколько веток;
7. Слой обрезки: Компонент представляет собой слой обрезки нейронной сети (НС);
8. Слой активации: Компонент представляет собой слой с функцией активации нейронной сети (НС);
9. Слой изменения размера: Компонент представляет собой слой нейронной сети (НС), служащий для изменения размера данных;
10. Слой суммирования: Компонент представляет собой слой суммирования нейронной сети (НС);
11. Выходной слой: Компонент представляет собой выходной слой нейронной сети (НС). Он содержит в себе последний полносвязный слой и функцию потерь. Для корректной работы нейронной сети необходимо подключить к нему блок НС - Режим работы;
12. Режим работы: Данный блок задает режим работы нейронной сети (НС). Для корректной работы схему нейронной сети всегда необходимо подключать этом блоку. В зависимости от выбранного режима работы у блока появляются соответствующие порты и свойства;
13. Исходные данные: Компонент представляет собой набор базовых тестовых примеров, которые необходимы как для проведения проверок работоспособности нейронной сети (НС), так и для обучения персонала работе с НС. Компонент работает совместно с файлами наборов данных (такими как база данных MNIST). Компонент предоставляет «чистые» данные и метки, если имеются для данного набора;
14. MNIST to PX: Данный блок преобразует данные MNIST в RGB.

В среде SimInTech возможно создание сверточных нейронных сетей благодаря модулю сверточный слой и рекуррентных нейронных сетей благодаря модулю полносвязный слой.

Примеры создания нейронной сети в среде SimInTech представлены на рисунках 3.8 и 3.9.

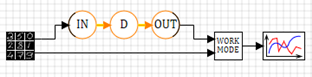


Рисунок 3.8 – Создание нейронной сети прямого распространения



Рисунок 3.9 – Создание сверточной нейронной сети

Сопоставительный анализ функционала приложений с функционалом создания машинного обучения представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Функции приложений по проектированию нейронных сетей

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | Персептроны | Сверточные нейросети | Рекуррентны е нейросети | Необходимы e программы | Шаблонные нейронные сети |
| Deep Learning Toolbox | Deep Network Designer | Да | Да | Да | Matlab | Да |
| Neural Fitting App | Да | Нет | Нет | Matlab |
| NeuroGenetic Optimizer | | Да | Нет | Да | Нет | Нет |
| SimInTech | | Да | Нет | Да | Нет | Нет |

## 4 Синтез портрета проектируемой системы

### 4.1 Формулирование требований к проектируемой системе

Исходя из проведенного обзора, можно сказать что наиболее полным функционалом обладает программа Deep Learning Toolbox, что предоставляет доступ к наиболее обширному арсеналу заготовленных слоёв и функций, а также выверенному синтаксису среды Matlab и полноценной документацией всех функций.

SimInTech предоставляет доступ к меньшему числу встроенных функций, однако обладает более интуитивно понятным интерфейсом и не требуют предустановки каких-либо программ.

Neural Fitting App и NeuroGenetic Optimizer предоставляют чрезвычайно полезный, но в тоже время крайне ситуативный функционал, который может пригодиться в процессе обучения нейронных сетей, но построение моделей на их основе если не невозможно, то крайне осложнено программными ограничениями.

Можно сделать вывод, что при проектировании среды визуального проектирования нейронных сетей на базе среды моделирования МАРС необходимо включить в её состав все базовые функции Deep Network Designer, а именно:

1. Блочную структуру построения нейронных сетей;
2. Возможность создания персептронов, рекуррентных и сверточных нейросетей;
3. Возможность тонкой настройки слоёв и синапсов;
4. Набор шаблонных нейронных сетей для решения тривиальных задач;
5. Полноценную документацию, проясняющую работу каждого отдельного модуля.

### 4.2 Обзор средств реализации

Для целей создания среды визуального моделирования нейронных сетей на базе среды моделирования МАРС актуальным является обзор существующих библиотек машинного обучения для их интеграции в разрабатываемое приложение. Ввиду наличия опыта интеграции кода СМ МАРС и программ на языке Python [8] обзор библиотек будет производиться для данного языка.

Библиотеки машинного обучения предоставляют средства для проектирования нейросетей следующих архитектур:

1) сети прямого распространения (многослойные персептроны, внутри которых информация поэтапно проходит от входного слоя до выходного), применяемые для решения задач классификации, регрессии и пр.;

2) нейронные сети свёрточного типа, применяемые для задач обработки и анализа изображений (их особенность –использование свёрточных слоёв для поэтапного извлечения заданных признаков из входного изображения);

3) нейронные сети рекуррентного типа, применяемые для задач, связанных с последовательными данными, такими как текст (их особенность – возможность обратного прохода сигналов между слоями и наличие внутренней памяти ).

Кратко охарактеризуем анализируемые библиотеки.

TensorFlow [9] предоставляет реализации нейросетей на языках: Python, C++, C#, R, Java и др. Работа TensorFlow основана на составления графа вычисления, который вычисляет «тензоры» – многомерные массивы, через которые могут быть представлены вектора признаков, изображение или массив изображений. Поскольку TensorFlow даёт лишь базовые компоненты для создания нейронных сетей, то для создания даже самой базовой сети прямого распространения необходимо полностью прописать её структуру и поведение на каждом из уровней.

Theano [10] – библиотека численного вычисления с открытым исходным кодом, созданная группой машинного обучения Монреальского Университета. По аналогии с TensorFlow Theano может быть использована в качестве ядра для моделей нейронных сетей, поэтому для создания нейронных сетей на базе Theano необходимо ручное создание всех необходимых конструктов, что во много раз усложняет создание даже самых простых сетей, при этом позволяет точно задать все необходимые параметры.

Keras [11] – библиотека с открытым исходным кодом высокого уровня, построенная на основе TensorFlow, но предлагающая более компактный и упрощенный синтаксис вкупе с возможностью простого создания рекуррентных и сверточных нейронных сетей путём использования готовых модулей. Модели нейронных сетей в Keras состоят из отдельных шаблонных слоёв, которые по очереди добавляются в объект типа модель.

Создание сверточной нейронной сети при помощи Keras представлено на рисунке 4.1

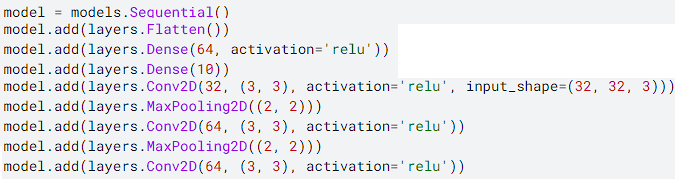


Рисунок 4.1 – Модель сверточной нейронной сети в Keras

Создание рекуррентной нейронной сети при помощи Keras представлено на рисунке 4.2.

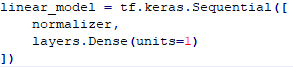


Рисунок 4.2 – Модель рекуррентной нейронной сети в Keras

PyTorch [12] – фреймворк машинного обучения с открытым исходным кодом, созданный на базе библиотеки Torch языка Lua. Фреймворк адаптирован для использования графических ускорителей одновременно с процессором в процессе тензорных вычислений, что во много раз увеличивает производительность. Кроме того, с помощью фреймворка возможно быстрое создание глубоких нейронных сетей. Модели нейронных сетей в PyTorch строятся на основе построения пользовательских классов с заданными слоями и порядком действий при переходе между слоями.

Создание сверточной нейронной сети при помощи PyTorch представлено на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Модель сверточной нейронной сети в PyTorch

Создание рекуррентной нейронной сети при помощи PyTorch представлено на рисунке 4.4.

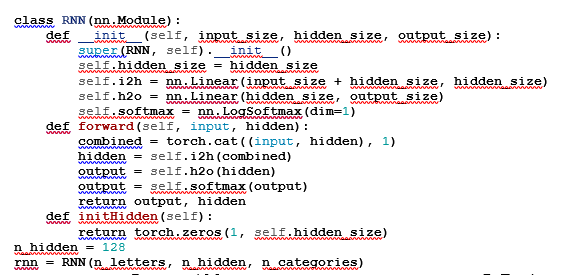


Рисунок 4.4 – Модель рекуррентной нейронной сети в PyTorch

PyBrain [13] – модульная библиотека машинного обучения. Модульность системы и встроенные методы обучения позволяют снизить порог вхождения при разработке с использованием данной библиотеки. Создание модели нейронной сети в PyBrain похоже на Keras так как слои задаются при помощи команд обьекта типа модели, но в отличии от Keras PyBrain требует ручного ввода связей между слоями. Библиотека PyBrain не поддерживает сверточные нейронные сети, однако полностью поддерживает рекуррентные сети.

Создание рекуррентной нейронной сети при помощи PyBrain представлено на рисунке 4.5.

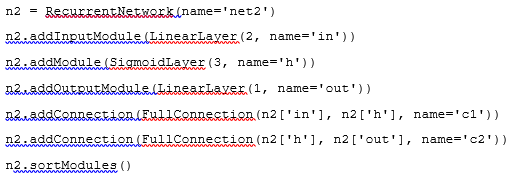


Рисунок 4.5 – Модель рекуррентной нейронной сети в PyBrain

Сопоставительный анализ функционала различных библиотек машинного обучения представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Функции библиотек машинного обучения

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Персептроны | Сверточные нейросети | Рекуррентные нейросети | Необходимые библиотеки | Поддержка GPU | Тип Лицензии |
| TensorFlow | Да | Пользовательские | Пользовательские | NumPy | Да | Apache 2.0 |
| Theano | Да | Пользовательские | Пользовательские | NumPy | Да | BSD |
| Keras | Да | Да | Да | NumPy, TensorFlow | Да (многопо-точная) | MIT Licence |
| PyTorch | Да | Да | Да | Нет | Да (многопо-точная) | BSD |
| PyBrain | Да | Нет | Да | SciPy | Нет | BSD |

Из собранных данных можно сделать вывод, что каждая библиотека обладает своими преимуществами и недостатками, в основном связанными с быстродействием и возможностью развёртывания определенных видов нейронных сетей. Поэтому выбор фреймворка для работы в первую очередь должен быть основан на требованиях проекта.

Из разобранных библиотек связка TensorFlow и Keras позволяет использовать легко создавать большую часть стандартных видов нейронных сетей. PyTorch обладает несколько более громоздким синтаксисом и требует больше внимательности при составлении модели нейронной сети, но позволяет проводить обучение нейронной сети во много раз быстрее благодаря поддержке многопоточных вычислений. Модульность PyBrain делает использование библиотеки выигрышным в условиях, когда необходимо создать нестандартную нейронную сеть, однако невозможность создание сверточных нейронных сетей сильно ограничивают эффективность библиотеки. Использование Theano на практике ограниченно из-за отсутствия каких-либо стандартных функций по работе с нейронными сетями.

Для разработки проекта наиболее подходящей библиотекой является PyTorch. Благодаря оптимизации для многопоточных вычислений PyTorch будет являться предпочтительным вариантом при наличии достаточно мощного аппаратного обеспечения, а возможность установки пользовательских связей между слоями делает эту библиотеку более гибкой для разработки для разработки, при этом более требовательной к математическим способностям пользователя. Keras предлагает более простой синтаксис и меньше возможностей по модификации стандартных элементов, что сильно упрощает разработку сетей где нет необходимости создания сложных пользовательских алгоритмов, однако для реализации настроек соединения слоёв-блоков нейронной сети такая организация будет менее удобной из-за ограниченных возможностей по настройки связи слоёв внутри создаваемой нейронной сети.

### 4.3 Архитектура системы

На данный момент можно синтезировать два варианта архитектуры средств по созданию нейронных сетей, которые позволят выполнить поставленные выше требования:

1. Построение нейронной сети в виде моноблока на логическом слое, где параметры нейронной сети задаются при помощи параметров блока;
2. Построение нейронной сети в более традиционном представлении множества соединённых компонентов, представляющие различные слои нейронной сети.

Плюсом первого варианта является простота использования для конечного пользователя: ему понадобиться лишь добавить нужный компонент на логический слой, а также возможность изменения параметров нейронной сети во время выполнения каких-либо действий. Минусом такого варианта является строгая типизация - если создать блок основываясь на механизме прямого распространения, то для использования другого типа нейронной сети придётся создавать совершенно другой блок.

Основным плюсом второго варианта является полная свобода действий со стороны пользователя: благодаря многоблочной архитектуре он волен создавать любую систему, что будет ему необходима, а также позволяет более гибкий инструментарий по оптимизации нейронной сети. Минусом подобной организации является более высокий порог вхождения: конечному пользователю необходимо иметь более глубокое представление о принципах работы и компоновки нейронных сетей.

#### 4.3.1 Одноблочная система

Для реализации одноблочной системы необходимо разместить единственный блок на логическом слое, на начало которого необходимо послать входные данные в виде тензора, в параметрах которого необходимо задать параметры нейронной сети и на выходе мы должны получить результат путём выполнения обучения.

На вход In подаются входные данные, выход Out выдаёт полученные данные.

Схема блока нейронной сети представлена на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 Схема блока «Нейронная Сеть»

Параметры блока «Нейронная сеть»:

1. Поле «Количество слоёв» - целочисленное число, определяющее количество скрытых слоёв нейронной сети;
2. Поле «Количество нейронов» - целочисленное число, определяющее количество нейронов на каждом скрытом слое нейронной сети;
3. Поле «Функция активация» - перечисление значений, определяющее тип функции активации для скрытых слоёв нейронной сети.

#### 4.3.2 Многоблочная система

Для реализации многоблочной системы необходимо разместить несколько блоков-модулей на логическом слое, представляющих собой все необходимые компоненты для построения и работы нейронной сети.

***Блок разделения на выборки***: необходим для разбиения входных данных на обучающую и тестовые выборки. На вход In подаются входные данные, на выходе Out\_T мы получаем тестовую выборку, на выходе Out\_O – обучающую выборку.

Схема блока разделения на выборки представлена на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 Схема блока «Разделение на выборки»

Параметры блока «Разделение на выборки»:

1. Поле «Доля обучающей выборки» - дробное число в диапазоне [0;1], определяющее долю обучающей выборки;
2. Поле «Константа воспроизведения» - целочисленное число, определяющее сид генератора случайных значений, используемого для разделения исходных данных.

***Блок обучения:*** необходим для обучения нейронной сети на основе выборки данных. На вход In\_O подаётся обучающая выборка, на вход In\_T – тестовая выборка, на вход M – сигнал, управляющий режимом обучения, на вход In\_R – реальный отклик нейронной сети. С выхода Out\_R выдаётся ошибка, с выхода Out\_W – рассчитанные весы нейронной сети.

Схема блока обучения представлена на рисунке 4.8.

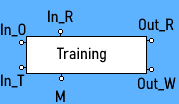


Рисунок 4.8 Схема блока «Обучение»

Параметры блока «Обучение»:

1. Поле «Метрика точности» - перечисление значений, определяющие используемую метрику оценки ошибок;
2. Поле «Метод оптимизации» - перечисление значений, определяющие используемый метод оптимизации;
3. Поле «Количество эпох обучения» - целочисленное число, определяющие количество эпох обучения;
4. Поле «Размер пакета данных» - целочисленное число, определяющие размер пакета данных;
5. Поле «Коэффициент скорости обучения» - дробное число в диапазоне [0;1], определяющее коэффициент скорости обучения;

***Входной слой:*** На вход In подаются входные данные, на вход Upd подаются обновленные в процессе обучения коэффициенты, выход Out передаёт их на скрытие слои.

Схема блока входного слоя представлена на рисунке 4.9.

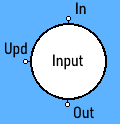


Рисунок 4.9 Схема блока «Входной слой»

Параметры блока «Входной слой»

1. Поле «Количество нейронов» - целочисленное число, определяющее количество нейронов во входном слое;
2. Поле «Функция активация» - перечисление значений, определяющее тип функции активации слоя.

***Скрытые слои:*** основные строительные блоки нейронной сети, в которых происходит преобразование входных данных. Существует огромное множество возможных вариантов скрытых слоёв для самых различных вариантов нейронных сетей. В рамках, составленных требования нам необходимо реализовать слои для работы сверточных, реккурентных и сетей прямого распространения. Для реализации сверточной нейронной сети нам нужны слои свертки и слои подвыборки, для реализации реккурентых сетей нужен слой с реализацией долгой краткосрочной памяти, а для реализации сетей прямого распространения необходим плотносвязанный слой.

Несмотря на разницу в работе блоков скрытых слоёв, их представление на логическом слое будет функционально идентичным и главным их отличием друг от друга будут параметры.

Схема блока скрытого слоя представлена на рисунке 4.10.

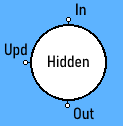


Рисунок 4.10 Схема блока «Скрытый слой»

На вход In подаются входные данные, на вход Upd подаются обновленные в процессе обучения коэффициенты, выход Out выдаёт полученные данные.

Для каждого вида скрытых слоёв задаётся поле «Количество нейронов» - целочисленное число, определяющее количество нейронов в скрытом слое;

Каждый вид блока скрытых слоёв также обладает своими собственными параметрами, зависящие от предназначения блока.

Параметры блока «Полносвязный слой»:

1. Поле «Количество входных записей» - целочисленное значение, определяющие количество входных записей.
2. Поле «Количество выходных откликов» - целочисленное значение, определяющие количество выходных записей.

Параметры блока «Слой свертки»:

1. Поле «Количество входных каналов» - целочисленное значение, определяющие количество входных каналов;
2. Поле «Количество выходных каналов» - целочисленное значение, определяющие количество выходных каналов;
3. Поле «Шаг свертки» - целочисленное значение, определяющие шаг свертки;
4. Поле «Размер сверточного ядра» - целочисленное значение, определяющие размер сверточного ядра;
5. Поле «Размер подбивки» - целочисленное значение, определяющие размер подбивки;
6. Поле «Расстояние между элементов ядра» - целочисленное значение, определяющие расстояние между элементов ядра;
7. Поле «Количество заблокированных соединений» - целочисленное значение, определяющие количество заблокированных соединение между входными и выходными каналами;
8. Поле «Обучаемое смещение» - логическое значение, определяющие наличие обучаемого смещения на слое;
9. Поле «Функция активация»: перечисление значений, определяющее тип функции активации слоя.

Параметры блока «Слой подвыборки»:

1. Поле «Шаг свертки» - целочисленное значение, определяющие шаг свертки;
2. Поле «Размер сверточного ядра» - целочисленное значение, определяющие размер сверточного ядра;
3. Поле «Подбивка» - логическое значение, определяющие наличие подбивки боковых значений отрицательными бесконечностями в случае несоответствия размеров;
4. Поле «Ширина шага свертки» - целочисленное значение, определяющие ширину шага свертки;
5. Поле «Возращение индексов» - логическое значение, определяющие возвращаются ли максимальные индексы вместе с выходными данными;
6. Поле «Режим Ceil» - логическое значение, определяющие используется ли режим Ceil для вычисления размера выходной формы. Если значение верно, используется режим Ceil, если неверно – режим Floor.

Параметры блока «Слой долгой краткосрочной памяти»:

1. Поле «Ожидаемое количество входных данных» - целочисленное значение, определяющие ожидаемое количество признаков входных данных;
2. Поле «Количество признаков в скрытом состоянии» - целочисленное значение, определяющие количество признаков в скрытом состоянии;
3. Поле «Количество рекуррентных слоёв» - целочисленное значение, определяющие количество рекуррентных слоёв;
4. Поле «Использование весов» - логическое значение, определяющие использование весов b\_ih и b\_h. Если значение верно, то весы используются;
5. Поле «Формат данных» - логическое значение, определяющие формат данных. Если значение верно, то формат данных представляется в виде (batch, seq, feature), если неверно, то в формате (seq, batch, feature);
6. Поле «Слой выпадения» - целочисленное значение, определяющие наличие слоя выпадения и шанса на выпадение. Если значение равно 0, то слой выпадения отсутствует, при любом другом значении слой выпадения присутствует и шанс на выпадение равен значению поля;
7. Поле «Размер проекции» - целочисленное значение, определяющие размер проекции;
8. Поле «Двунаправленный слой» - логическое значение, определяющие является ли свои двунаправленным или нет.

***Выходной слой:*** этот блок передаёт полученный результат работы нейронной сети далее по схеме.

На вход In подаются входные данные, выход Out выдаёт полученные данные.

Схема блока выходного слоя представлена на рисунке 4.11.

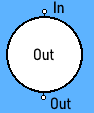


Рисунок 4.11 Схема блока «Выходной слой»

Параметры блока «Выходной слой»

1. Поле «Количество нейронов» - целочисленное число, определяющее количество нейронов во выходном слое;
2. Поле «Функция активация» - перечисление значений, определяющее тип функции активации слоя.

## 5 Работа с нейронными сетями в PyTorch

Создание нейронных сетей в PyTorch основывается на базовом классе nn.Module. В состав класса входит 2 функции: конструктор \_\_init\_\_ и функция forward, которая определяет вычисления, выполняемые при каждом вызове. nn.Module также может содержать в себе другие элементы типа nn.Module, благодаря чему PyTorch позволяет создавать многослойные нейронные сети.

Структура нейронной сети определяется путём добавления модулей слоёв в конструктор \_\_init\_\_ через конструкцию self.\*название модуля\*. На рисунке 5.1 представлено определение структуры стандартной сверточной нейронной сети состоящей из двух сверточных слоёв в функции \_\_init\_\_.

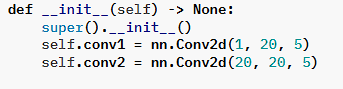


Рисунок 5.1 Определение структуры нейронной сети

Определение функции прохода forward для той же нейронной сети можно увидеть на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2. Определение функции прохода нейронной сети

Подобная организация позволяет создавать на её основе гибкие многофункциональные системы и узконаправленные сети, кроме того такая структура отлично масштабируется благодаря вложенности.

### 5.1 Работа с нейронными сетями прямого распространения

Для создания нейронных сетей прямого распространения в фреймворке PyTorch используется модуль nn.Linear и его ответвление nn.Bilinear.

Модуль nn.Linear представляет собой слой, который применяет линейное преобразование к входным данным. Он называется линейным преобразованием, потому что применяет линейное уравнение к передаваемым данным.

Модуль nn.Linear ожидает, что входные данные будут представлены в виде одномерного, двухмерного или трехмерного тензора, последняя размерность которого - размер входных данных, а остальные размерности - размер партии и другие размерности.

Параметры модуля:

1. in\_features – размер входной выборки;
2. out\_features – размер выходной выборки;
3. bias – если False, то слой не использует весы смещения b\_ih или b\_hh. Значение по умолчанию: True.

Модуль nn.Bilinear представляет собой ответвление от модуля nn.Linear которое применяет билинейное преобразование к входящим данным.

Параметры модуля:

1. in1\_features – размер первой входной выборки;
2. in2\_features – размер второй входной выборки;
3. out\_features – размер выходной выборки;
4. bias – если False, то слой не использует весы смещения b\_ih или b\_hh. Значение по умолчанию: True.

### 5.2 Работа с рекуррентными нейронными сетями

Для создания рекуррентных нейронных сетей в фреймворке PyTorch существуют три модуля, представляющих различные имплементации данной концепции: nn.RNN, nn.LSTM и nn.GRU.

Модуль nn.RNN представляет собой модель нейронной сети Элмана. Нейронная сеть Элмана представляет собой рекуррентную нейронную сеть, полученную в результате добавления обратных связей в многослойный персептрон.

Схема сети Элмана можно увидеть на рисунке 5.3.

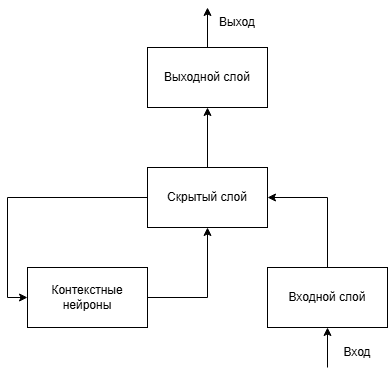


Рисунок 5.3 – Схема рекуррентной нейронной сети Элмана

Сеть Элмана представляет собой самый простой вариант создания рекуррентной нейронной сети из представленных в PyTorch и обладает рядом достоинств, в первую очередь высокой скоростью, простотой тренировки и низкими требованиями к мощности. Однако сети Элмана намного хуже справляются с большими объемами данных.

Параметры модуля:

1. input\_size – количество ожидаемых признаков во входных данных;
2. hidden\_size – количество признаков в скрытом состоянии;
3. num\_layers – количество рекуррентных слоёв. Например, num\_layers=2 означает, что модуль будет представлять собой соединение 2 моделей Элмана, вторая из которых при этом будет принимать вывод данных из первой на свой входной слой. Значение по умолчанию: 1;
4. nonlinearity – используемая модель нелинейности. Может принимать значения 'tanh' или 'relu'. Значение по умолчанию: 'tanh';
5. bias – если False, то слой не использует весы смещения b\_ih или b\_hh. Значение по умолчанию: True;
6. batch\_first – Если True, то входные и выходные тензоры будут представлены как (batch, seq, feature) вместо (seq, batch, feature). При этом, это не относится к скрытым и ячейковым состояниям. Значение по умолчанию: False;
7. dropout – если значение отличается от нуля, то добавляет слой Отключения/Dropout на выход каждого слоя RNN кроме последнего. Шанс на исключения равен заданному значению. Значение по умолчанию: 0;
8. bidirectional – если True, то модель становится двунаправленной RNN. Значение по умолчанию: False.

Данные на вход:

1. Input – тензор выбранного параметром batch\_first формата или формата (seq,input\_size) для непакетных данных;
2. h\_0 – тензор, содержащий начальное скрытое состояние для входной последовательности. Значение по умолчанию: нули. Формат тензора: (D\*num\_layers,hidden\_size) или (D\*num\_layers,batch,hidden\_size), где D = 1 или 2, в зависимости от того, является ли сеть двунаправленной.

Данные на выход:

1. output – тензор выбранного параметром batch\_first формата или формата (seq,hidden\_size) для непакетных данных
2. h\_n – тензор, содержащий финальное скрытое состояние. Значение по умолчанию: нули. Формат тензора: (D\*num\_layers,hidden\_size) или (D\*num\_layers,batch,hidden\_size), где D = 1 или 2, в зависимости от того, является ли сеть двунаправленной.

Модуль nn.LSTM представляет собой модель Долгосрочной Короткой Памяти (англ. Long Short Term Memory, LSTM). Особенностью LSTM является возможность запоминания значений на короткие и длинные промежутки путём использования механизмов фильтров/врат, которые позволяют «доставать» из памяти необходимые данные в нужный момент. Схема Долгосрочной Короткой Памяти представлена на рисунке 5.4.

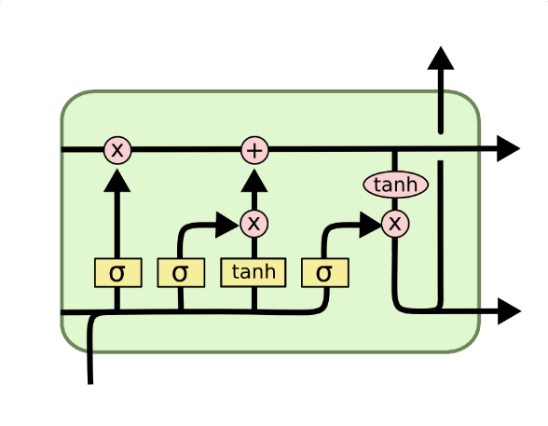


Рисунок 5.4 – Схема Долгосрочной Короткой Памяти

LSTM-сети лучше всего подходят для решения задач с большим объемом данных и необходимостью наиболее точных результатов, однако из-за механизма фильтров они также являются более ресурсозатратными.

Параметры модуля:

1. input\_size – количество ожидаемых признаков во входных данных;
2. hidden\_size – количество признаков в скрытом состоянии;
3. num\_layers – количество рекуррентных слоёв. Например, num\_layers=2 означает, что модуль будет представлять собой соединение 2 LSTM-модулей, второй из которых при этом будет принимать вывод данных из первого на свой входной слой. Значение по умолчанию: 1;
4. bias – если False, то слой не использует весы смещения b\_ih или b\_hh. Значение по умолчанию: True;
5. batch\_first – Если True, то входные и выходные тензоры будут представлены как (batch, seq, feature) вместо (seq, batch, feature). При этом, это не относится к скрытым и ячейковым состояниям. Значение по умолчанию: False;
6. dropout – если значение отличается от нуля, то добавляет слой Отключения/Dropout на выход каждого слоя RNN кроме последнего. Шанс на исключения равен заданному значению. Значение по умолчанию: 0;
7. bidirectional – если True, то модель становится двунаправленной RNN. Значение по умолчанию: False;
8. proj\_size – если > 0, будет использоваться LSTM с проекциями соответствующего размера. Должен быть меньше чем hidden\_size. Значение по умолчанию: 0.

Данные на вход:

1. Input – тензор выбранного параметром batch\_first формата или формата (seq,input\_size) для непакетных данных;
2. h\_0 – тензор, содержащий начальное скрытое состояние для каждого элемента входной последовательности. Формат тензора: (D\*num\_layers,hidden\_size) или (D\*num\_layers,batch,hidden\_size), где D = 1 или 2, в зависимости от того, является ли сеть двунаправленной. hidden\_size заменяется на proj\_size если его значение >0. Значение по умолчанию: нули;
3. c\_0 – тензор, содержащий начальное состояние ячейки для каждого элемента входной последовательности. Формат тензора: (D\*num\_layers,hidden\_size) или (D\*num\_layers,batch,hidden\_size), где D = 1 или 2, в зависимости от того, является ли сеть двунаправленной. Значение по умолчанию: нули;

Данные на выход:

1. output – тензор формата (seq, batch, D\*hidden\_size)/(batch,seq,D\*hidden\_size) или формата (seq,D\* hidden\_size) для непакетных данных. hidden\_size заменяется на proj\_size если его значение >0.
2. h\_n – тензор, содержащий финальное скрытое состояние. Значение по умолчанию: нули. Формат тензора: (D\*num\_layers,hidden\_size) или (D\*num\_layers,batch,hidden\_size), где D = 1 или 2, в зависимости от того, является ли сеть двунаправленной.
3. c\_n – тензор, содержащий финальное состояние ячейки для каждого элемента входной последовательности. Формат тензора: (D\*num\_layers,hidden\_size) или (D\*num\_layers,batch,hidden\_size), где D = 1 или 2, в зависимости от того, является ли сеть двунаправленной. Если bidirectional = True, c\_n будет содержать объединение финальных состояний ячеек прямого и обратного направления, соответственно.;

Модуль nn.RNN представляет собой модель Управляемого Рекуррентного Блока (англ. Gated Recurrent Unit, GRU). GRU представляет собой упрощенную модель сети LSTM, где в отличии от неё нет постоянной ячейки памяти. Схема Долгосрочной Короткой Памяти представлена на рисунке 5.5.

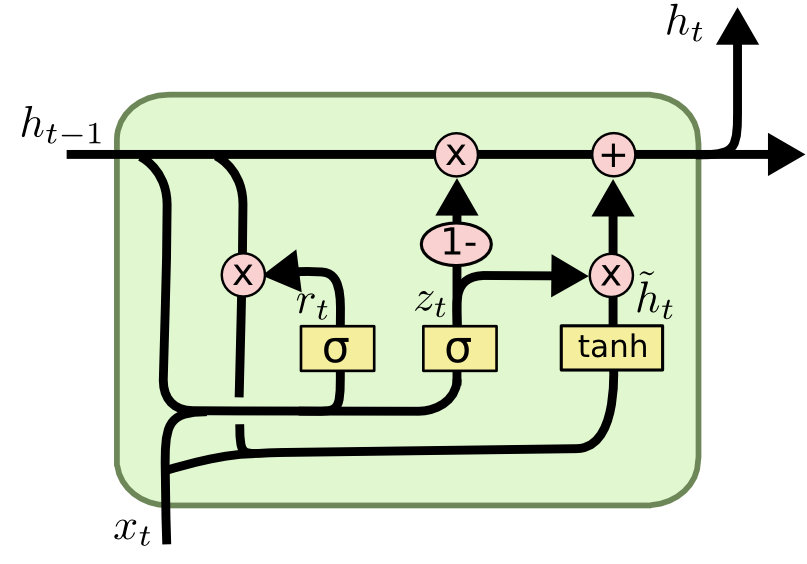


Рисунок 5.5 – Схема Управляемого Рекуррентного Блока

По сравнению с LSTM GRU имеет меньшее количество параметров и меньшую ресурсозатратность из-за отсутствия выходного фильтра и состояния ячеек, что позволяет использовать GRU там, где LSTM является избыточной, предоставляя при этом сравнимые по точности результаты. Однако из-за отсутствия постоянной ячейки памяти GRU проигрывает LSTM при работе с большими объемами данных.

Параметры модуля:

1. input\_size – количество ожидаемых признаков во входных данных;
2. hidden\_size – количество признаков в скрытом состоянии;
3. num\_layers – количество рекуррентных слоёв. Например, num\_layers=2 означает, что модуль будет представлять собой соединение 2 моделей Элмана, вторая из которых при этом будет принимать вывод данных из первой на свой входной слой. Значение по умолчанию: 1;
4. bias – если False, то слой не использует весы смещения b\_ih или b\_hh. Значение по умолчанию: True;
5. batch\_first – Если True, то входные и выходные тензоры будут представлены как (batch, seq, feature) вместо (seq, batch, feature). При этом, это не относится к скрытым и ячейковым состояниям. Значение по умолчанию: False;
6. dropout – если значение отличается от нуля, то добавляет слой Отключения/Dropout на выход каждого слоя RNN кроме последнего. Шанс на исключения равен заданному значению. Значение по умолчанию: 0;
7. bidirectional – если True, то модель становится двунаправленной RNN. Значение по умолчанию: False.

Данные на вход:

1. Input – тензор выбранного параметром batch\_first формата или формата (seq,input\_size) для непакетных данных;
2. h\_0 – тензор, содержащий начальное скрытое состояние для входной последовательности. Значение по умолчанию: нули. Формат тензора: (D\*num\_layers,hidden\_size) или (D\*num\_layers,batch,hidden\_size), где D = 1 или 2, в зависимости от того, является ли сеть двунаправленной.

Данные на выход:

1. output – тензор формата (seq, batch, D\*hidden\_size)/(batch,seq,D\*hidden\_size)или формата (seq,D\*hidden\_size) для непакетных данных
2. h\_n – тензор, содержащий финальное скрытое состояние. Значение по умолчанию: нули. Формат тензора: (D\*num\_layers,hidden\_size) или (D\*num\_layers,batch,hidden\_size), где D = 1 или 2, в зависимости от того, является ли сеть двунаправленной.

В результате исследования была составлена таблица 5.1, внутри которой приведено сравнение различных характеристик модулей, используемых для построения рекуррентных нейронных сетей. Таблица 5.1 представлена ниже.

Таблица 5.1 – Сравнение модулей рекуррентных нейронных сетей

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Свойство | RNN | LSTM | GRU |
| Структура | Три связанных слоя | Система из трёх фильтров и ячеек памяти | Система из двух фильтров |
| Время тренировки | Быстрое, но неточное | Медленнее из-за большего количества фильтров и операций с памятью. | Быстрее, чем LSTM, но медленнее, чем RNN, из-за системы фильтров. |
| Требования к памяти | Низкие требования к памяти. | Высокое потребление памяти из-за сложной архитектуры | Меньшее потребление памяти по сравнению с LSTM, но большее по сравнению с RNN |
| Работа с длинными последовательностями | Проблемы с поддержанием долгосрочных зависимостей из-за затухания градиентов. | Превосходно справляется с отображением долгосрочных зависимостей благодаря ячейкам памяти. | Эффективнее, чем RNN, но менее эффективен, по сравнению с LSTM, для долгосрочных зависимостей. |
| Сложность тренировки | Склонность к затуханию градиентам, что затрудняет обучение на длинных последовательностях. | Легче тренировать длинные последовательности благодаря ячейкам памяти | Проще, чем LSTM, и легче в обучении, чем RNN, сохраняя при этом эффективность |

Основываясь на полученных данных можно сказать, что для выбора нужного блока для создания рекуррентной нейронной сети нужно отталкиваться от целей применения и доступных мощностей. Если в приоритете точность или предполагается использование длинных последовательностей, то LSTM является наиболее предпочтительным вариантом, однако она также является наиболее ресурсоёмкой. Если ресурсы ограничены, GRU предоставляет схожую с LSTM точность, при значительно меньшем потреблением памяти и вычислительных мощностей. На данный момент RNN предпочтительны к использованию если в приоритете скорость и к использованию предполагаются короткие последовательности.

В целях проверки теории было решено измерить производительность различных модулей путём создания трёх нейронных сетей, идентичных по своему составу кроме модуля рекуррентного слоя, и использовать их для решения задачи прогнозирования временных рядов и экстраполяции данных цен на бирже.

В качестве датасета для прогнозирования использовались данные о стоимости акций AAPL, доступные через обращение к библиотеке YFinance.

В качестве метрик для оценки качества были взяты: скорость тренировки, средняя абсолютная ошибка (MAE), коэффициент детерминации R2. Также субъективно оценивалась сложность составления сети. Для каждой задачи было проведено 10 измерений и в итоге были записаны их средние значения.

Сравнение скорости тренировки, средней абсолютной ошибки и производительности различных модулей представлены в таблицах 5.2–5.6.

Таблица 5.2 – Скорость тренировки нейронных сетей с различным модулем рекуррентного слоя

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | Скорость обучения LSTM, c | Скорость обучения RNN, c | Скорость обучения GRU, c |
| 1 | 343,7605 | 397,376 | 399,2546 |
| 2 | 411,7926 | 390,0983 | 335,5638 |
| 3 | 378,8344 | 350,1509 | 341,0333 |
| 4 | 407,7142 | 392,0773 | 391,9251 |
| 5 | 404,607 | 353,9301 | 397,6111 |
| 6 | 397,5382 | 404,3469 | 390,0731 |
| 7 | 403,9959 | 284,7281 | 396,8586 |
| 8 | 398,1452 | 319,8039 | 374,2337 |
| 9 | 404,1109 | 308,0997 | 335,1703 |
| 10 | 406,1499 | 353,8356 | 357,3788 |
| Среднее значение | 395,66488 | 355,44468 | 371,91024 |

Как видно из полученных данных, LSTM медленнее RNN и GRU в скорости тренировки на 11% и 6% соответственно.

Таблица 5.3 – Сравнение точности нейронных сетей с различным модулем рекуррентного слоя при прогнозировании временных рядов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | R2 LSTM | R2 RNN | R2 GRU |
| 1 | 0,9956 | 0,9962 | 0,9901 |
| 2 | 0,9953 | 0,996 | 0,9913 |
| 3 | 0,9969 | 0,9968 | 0,9941 |
| 4 | 0,9964 | -0,1743 | 0,9953 |
| 5 | 0,9975 | 0,9582 | 0,9863 |
| 6 | 0,9971 | 0,9944 | -0,0175 |
| 7 | 0,9963 | 0,9967 | 0,9832 |
| 8 | 0,9975 | 0,9973 | 0,9763 |
| 9 | 0,9977 | 0,9914 | 0,9932 |
| 10 | 0,9973 | 0,9451 | 0,9921 |
| Среднее значение | 0,99676 | 0,86978 | 0,8884 |

Таблица 5.4 – Сравнение точности нейронных сетей с различным модулем рекуррентного слоя при решении задачи экстраполяции

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | R2 LSTM | R2 RNN | R2 GRU |
| 1 | 0,3064 | 0,1896 | 0,2286 |
| 2 | 0,1777 | 0,4687 | 0,0415 |
| 3 | 0,3714 | 0,4061 | 0,1777 |
| 4 | 0,1844 | 0,0132 | 0,4388 |
| 5 | 0,3322 | -0,2869 | 0,0682 |
| 6 | 0,3725 | 0,4859 | 0,444 |
| 7 | 0,204 | 0,5584 | 0,4282 |
| 8 | 0,5652 | -0,0404 | 0,4295 |
| 9 | 0,458 | 0,0322 | 0,1672 |
| 10 | 0,2734 | 0,0584 | 0,291 |
| Среднее значение | 0,32452 | 0,18852 | 0,27147 |

В плане точности экстраполяции составленные нейронные сети не проявляют особых результатов, однако сеть на базе LSTM вновь оказывается самой точной.

Таблица 5.5 – Сравнение средней абсолютной ошибка нейронных сетей с различным модулем рекуррентного слоя при прогнозировании временных рядов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | MAELSTM | MAERNN | MAEGRU |
| 1 | 0,014 | 0,0114 | 0,0185 |
| 2 | 0,0139 | 0,013 | 0,0247 |
| 3 | 0,0112 | 0,0112 | 0,00134 |
| 4 | 0,0118 | 0,541 | 0,0759 |
| 5 | 0,0095 | 0,0483 | 0,06732 |
| 6 | 0,0107 | 0,016 | 0,0804 |
| 7 | 0,0129 | 0,0122 | 0,0978 |
| 8 | 0,0099 | 0,0998 | 0,113 |
| 9 | 0,0093 | 0,1025 | 0,1256 |
| 10 | 0,01 | 0,1385 | 0,142 |
| Среднее значение | 0,01132 | 0,09939 | 0,074656 |

Таблица 5.6 – Сравнение средней абсолютной ошибка нейронных сетей с различным модулем рекуррентного слоя при решении задачи экстраполяции

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | MAELSTM | MAERNN | MAEGRU |
| 1 | 0,0257 | 0,0315 | 0,0268 |
| 2 | 0,0349 | 0,0222 | 0,3782 |
| 3 | 0,0229 | 0,0272 | 0,2375 |
| 4 | 0,028 | 0,475 | 0,228 |
| 5 | 0,0254 | 0,077 | 0,1535 |
| 6 | 0,0237 | 0,0212 | 0,0695 |
| 7 | 0,0291 | 0,0213 | 0,2178 |
| 8 | 0,0204 | 0,228 | 0,1446 |
| 9 | 0,0218 | 0,2338 | 0,3638 |
| 10 | 0,026 | 0,367 | 0,1586 |
| Среднее значение | 0,02579 | 0,15042 | 0,19783 |

Сравнение сложности составления сети представлена в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Сравнение сложности составления и работы с различными модулями рекуррентных слоёв

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Свойства | LSTM | RNN | GRU |
| Передача скрытого состояния на выход | Да | Да | Да |
| Передача состояния ячейки на выход | Да | Нет | Нет |
| Количество параметров | 8 | 8 | 7 |
| Возможность установки количества слоёв | Да | Да | Да |
| Возможность использования в Sequential | Нет | Нет | Нет |

С точки зрения разработки сетей модули RNN и GRU полностью взаимозаменяемы. Главной проблемой с интеграцией всех представленных модулей является невозможность использования их в модуле Sequential, на котором основывается работа динамического количества слоёв в системе. Для решения этой проблемы можно использовать функцию, которая будет извлекать из выходных данных рекуррентного слоя скрытое состояния и/или состояние ячейки.

Изучив теоретические основания [14], техническую документацию и проверив различные модули рекуррентных слоёв в PyTorch можно сделать вывод, что наиболее перспективным вариантом для разработки является рекуррентные нейронные сети на базе модуля LSTM. Обладая наибольшей точностью среди других модулей рекуррентных слоёв LSTM компенсирует самое долгое время обучения нейронной сети путём большей оптимизации под длинные последовательности данных, сохраняя при это относительную простую структуру, схожую почти по всем параметрам с другими модулями рекуррентных слоёв.

### 5.3 Работа со сверточным нейронными сетями

Для создания сверточных нейронных сетей фреймворк PyTorch предоставляет широкий ассортимент модулей, главным образом отличающихся друг от друга ожидаемыми входными данными.

Модули nn.Conv1d, nn.Conv2d и nn.Conv3d представляют собой модули, применяющие преобразование к входным данным. Главной отличие между ними заключается именно в форме входных данных. По названию nn.Conv1d принимает одномерные тензоры, nn.Conv2d – двумерные, а nn.Conv3d – трехмерные.

У всех трёх слоёв одинаковые параметры:

1. in\_channels - Количество каналов во входном изображении;
2. out\_channels - Количество каналов, полученных в результате свертки
3. kernel\_size - Размер сверточного ядра;
4. stride - ширина полосы свертки. По умолчанию: 1;
5. padding - Добавление разметки к обеим сторонам входного изображения. По умолчанию: 0;
6. dilation - Расстояние между элементами ядра. По умолчанию: 1;
7. groups - Количество блокированных соединений от входных каналов к выходным. По умолчанию: 1;
8. bias - Если True, добавляет обучаемое искажение к выходу. По умолчанию: True;
9. padding\_mode – Режим «набивки». По умолчанию: нули.

Слой субдискретизации (иначе подвыборки или «пулинга») представляет собой нелинейное уплотнение карты признаков, при этом группа пикселей (обычно размера 2×2) уплотняется до одного пикселя, проходя нелинейное преобразование. Наиболее употребительна при этом функция максимума. Преобразования затрагивают непересекающиеся прямоугольники или квадраты, каждый из которых ужимается в один пиксель, при этом выбирается пиксель, имеющий максимальное значение. Операция субдискретизации позволяет существенно уменьшить пространственный объём изображения. Субдискретизация интерпретируется так: если на предыдущей операции свёртки уже были выявлены некоторые признаки, то для дальнейшей обработки настолько подробное изображение уже не нужно, и оно уплотняется до менее подробного.

К тому же фильтрация уже ненужных деталей помогает не переобучаться. Слой субдискретизации, как правило, вставляется после слоя свёртки перед слоем следующей свёртки

Слои субдискретизации в PyTorch представлены вариантами функции максимума MaxPool1d, MaxPool2d и MaxPool3d для одномерных, двумерных и трехмерных тензоров соответственно и AvgPool1d, AvgPool2d и AvgPool3d для функции среднего значения.

Параметры модулей функции максимума;

1. kernel\_size - Размер скользящего окна, должен быть больше 0;
2. stride - Ширина скользящего окна, должна быть больше 0. Значение по умолчанию - kernel\_size;
3. padding - Неявное отрицательное бесконечное добавление с обеих сторон, должно быть >= 0 и <= kernel\_size / 2;
4. dilation - Размах между элементами в скользящем окне, должно быть > 0;
5. return\_indices - Если True, возвращает argmax вместе с максимальными значениями;
6. ceil\_mode - Если True, то для вычисления выходной формы будет использоваться ceil вместо floor. Это гарантирует, что каждый элемент входного тензора будет покрыт скользящим окном;

Параметры модулей функции среднего значения:

1. kernel\_size - Размер скользящего окна, должен быть больше 0;
2. stride - Ширина скользящего окна, должна быть больше 0. Значение по умолчанию - kernel\_size;
3. padding - Неявное отрицательное бесконечное добавление с обеих сторон, должно быть >= 0 и <= kernel\_size / 2;
4. ceil\_mode - Если True, то для вычисления выходной формы будет использоваться ceil вместо floor. Это гарантирует, что каждый элемент входного тензора будет покрыт скользящим окном;
5. count\_include\_pad - Если значение True, то нулевая прокладка будет включена в расчет усреднения;
6. divisor\_override - Если указано, то будет использоваться в качестве делителя, иначе будет использоваться размер области объединения.

## Реализация нейронных сетей для модулей системы

### 6.1 Реализация моноблочных сетей

Для реализации моноблочных сетей было решено создать класс-оболочку, включающею в себя саму нейронную сеть, а также функции тренировки и валидации.

Поскольку планируется создание множества блоков для различных видов нейронных сетей было решено создать абстрактный класс NeuralNetworkBlock от которого будут наследоваться отдельные моноблоки. Данный класс содержит в себе определения для функции train(), которая описывает собой процесс тренировки модели, а также evaluate(), описывающую процесс валидации результатов работы нейронной сети. Далее, сама нейронная сеть будет представлена в виде отдельного класса, наследованного от nn.Module в который при создании экземпляра будут передаваться различные параметры сети, различные в зависимости от создаваемого блока. Для класса, описывающего моноблок нейронной сети прямого распространения — это будет значения количества входных признаков, количества нейронов в скрытых слоях и количества выходных признаков, а также тип функции активации и количество скрытых слоёв.

Для реализации динамического количества скрытых слоёв с настраиваемым количеством нейронов в них было решено использовать класс-оболочку nn. Sequential и передавать динамически-созданные слои в неё, что позволяет создать единообразную функцию forward, которая будет считывать каждый класс из Sequential в порядке добавления его в оболочку, что решает проблему чёткого определения слоёв в модели.

Диаграмма классов моноблока на примере блока нейронной сети прямого распространения представлена на рисунке 6.1.

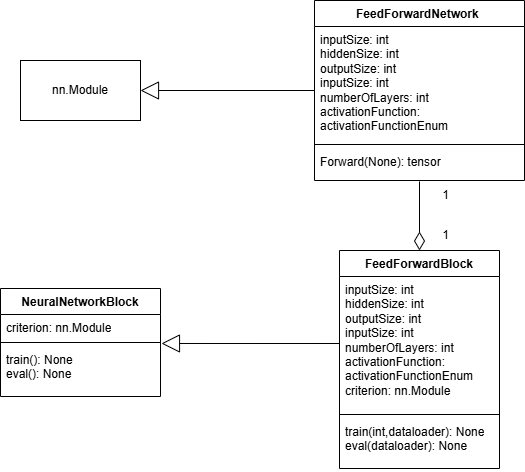


Рисунок 6.1 – Диаграмма составных классов для моноблока нейронной сети прямого распространения

Определение слоёв нейронной сети на примере модели нейронной сети прямого распространения и её функции forward представлена на рисунке 6.2.

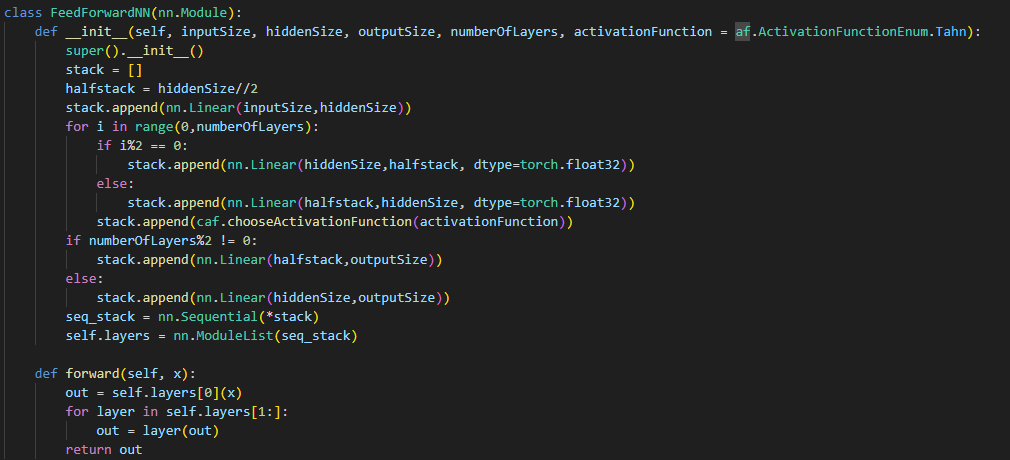


Рисунок 6.2 – Определение нейронной сети прямого распространения с динамическим количеством слоёв

Пример использования блока со стороны кода на примере блока рекуррентной нейронной сети представлен на рисунке 6.3.

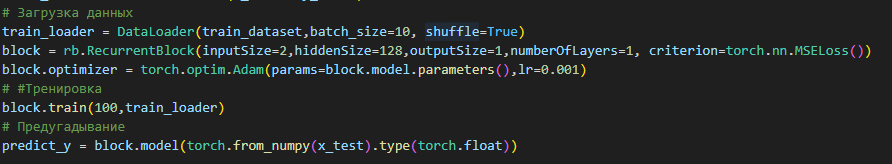


Рисунок 6.3 – Использование моноблока

### 6.2 Реализация многоблочных сетей

Для реализации многоблочной системы было решено использовать функцию exec() языка Python, которая выполняет передаваемый в нее в виде строки код. Это позволяет динамически составлять модель нейронной сети путём добавления различных модулей слоёв в собираемую пользователем строку путём соединения различных блоков в интерфейсе среды моделирования МАРС.

Каждый такой блок представляет собой функцию, принимающую в себя строку и добавляющую к ней строку-определение модуля с различными установленными пользователем параметрами для PyTorch. Поскольку предполагается создание множества вариантов конечной сети было решено использовать шаблон проектирования «Строитель» для упрощения работы с объектом. В конечном итоге был создан класс CustomModelScript, в котором находится строковое поле, содержащее саму строку, а также методы, которые добавляют к строке необходимые строчки кода по пользовательской спецификации.

Сам код исполняется в классе CustomNN, куда передается составленная строка и она выполняется путём её передачи в exec() через блок-класс CustomBlock, в котором определены функции для тренировки и валидации сети..

Пример многоблочного создания нейронной сети со стороны кода представлен на рисунке 6.4.

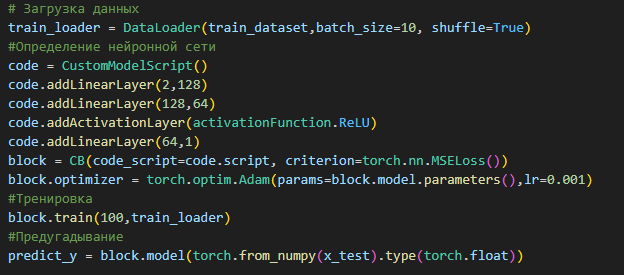


Рисунок 6.4 – Создание архитектуры нейронной сети

Структура созданной таким образом нейронной сети представлена на рисунке 6.5.

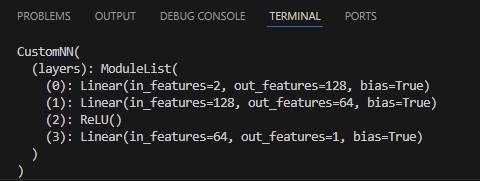


Рисунок 6.5 Образец созданной нейронной сети

Как видно из полученной в результате работы строителя сети, алгоритм добавления блоков работает так, как было задумано.

## Темы для преддипломной практики

### 7.1 DearPyGUI

DearPyGUI – графический фреймворк [15] для языка Python созданный на основе Dear ImGUI и других расширений с целью создание простого и оптимизированного фреймворка для создания интерфейса. Главным отличием DearPyGUI от Dear ImGUI является использование парадигмы сохраненного режима при создании API, что позволяет сохранять схему рендеринга самой библиотекой вместо клиента, в то время как Dear ImGUI использует схему немедленного режима. Это позволяет создавать намного более динамичные интерфейсы.

Подобно PyQt, DearPyGUI не использует встроенные виджеты, а рисует их с помощью видеокарты персонального компьютера с использованием API рендеринга, а именно Directx11, Metal и Vulkan в зависимости от системы.

Аналогично тому, как Dear ImGUI предоставляет разработчикам игр возможность создавать простые и эффективные графические интерфейсы приложений, DPG предоставляет разработчикам Python возможность создавать быстрые и мощные графические интерфейсы для скриптов.

Цикл рендеринга (или цикл событий) работает непрерывно и отвечает за обработку пользовательского ввода и отрисовку виджетов.

Отрисовка элементов - это то, как DearPyGUI обновляет элементы. DearPyGUI делает это со скоростью обновления монитора, если для параметра set\_viewport\_vsync установлено значение True. Если значение vsync установлено False, цикл рендеринга будет выполняться максимально быстро. Если внутри цикла рендеринга единовременно будет выполнятся слишком много операций, требующих больших вычислительных затрат, то это может снизить частоту кадров разрабатываемого приложения.

Пример интерфейса созданного на основе фреймворка DearPyGUI представлен на рисунке 7.1.

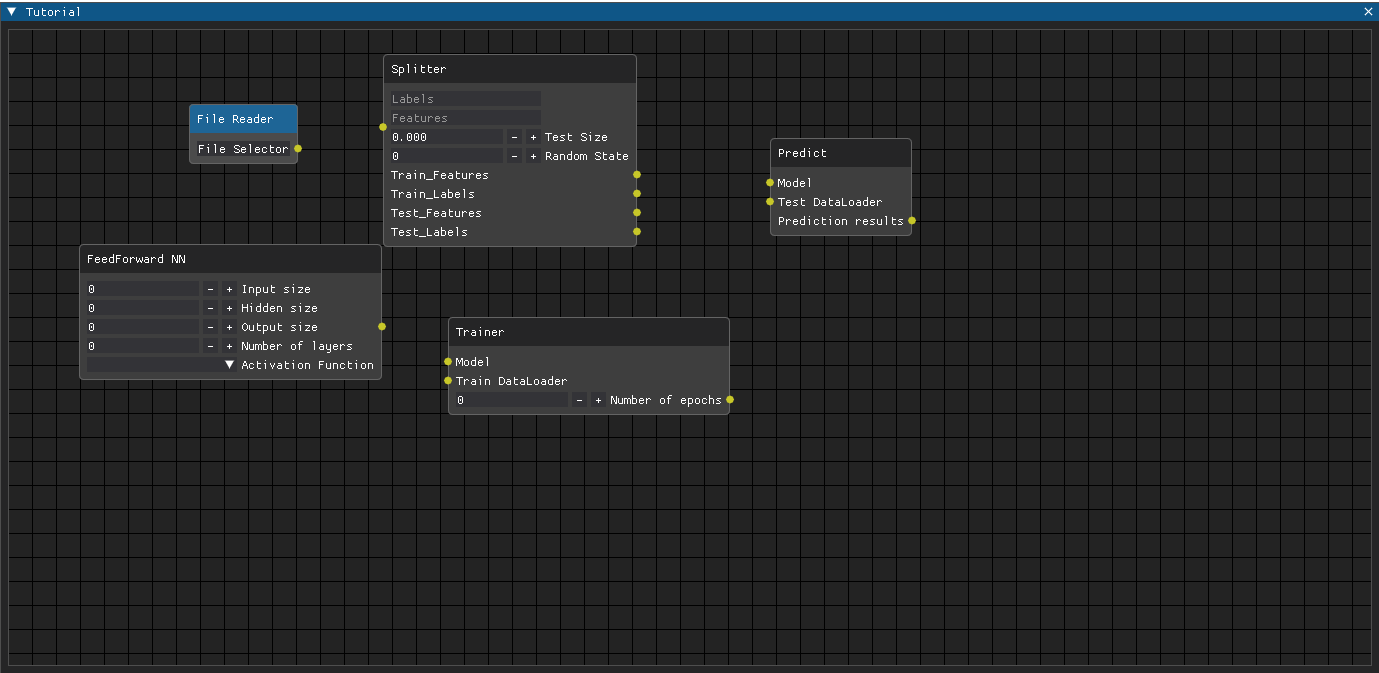


Рисунок 7.1 Пример интерфейса на DearPyGUI

### Элементы конструктора нейронных сетей

Элемент Reader представляет собой блок, основной задаче которого является считывание данных из файла, их преобразование в объект данных и передача далее по цепочке блоков. Благодаря библиотеке Pandas предоставляется возможность использования в качестве датасетов файлов текстового формата .CSV и файлов формата Excel .xlsx, .xlsm, .xlsb, .odf, .ods и .odt. На выходе блок отдаёт значение формата DataFrame, содержащие выбранный пользователем датасет.

Входные данные блока:

1. В качестве входных данных блок принимает путь к файлу на персональном компьютере пользователя. Пользователь может прописать путь вручную или же воспользоваться интерфейсом выбора файла, вызываемого через нажатие кнопки «Choose file».

Выходные данные блока:

1. В качестве выходных данных блок предоставляет датасет формата DataFrame через порт Dataset.

Блок Reader в интерфейсе конструктора представлен на рисунке 1.

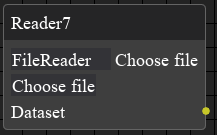


Рисунок 1 – Блок Reader

Интерфейс выбора файла представлен на рисунке 2.

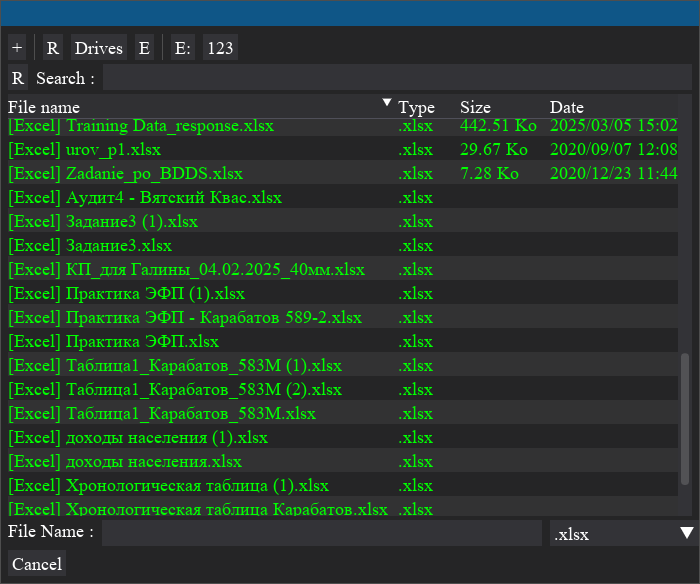


Рисунок 2 – Интерфейс выбора файла

## Заключение

В рамках данной научно-исследовательской работы были проведены исследования основных принципов работы нейронных сетей и глубокого машинного обучения, основные функции и структура среды моделирования МАРС, а также составлен первичный портрет проектируемой системы и выбраны средства реализации для создания среды визуального моделирования нейронных сетей на базе СМ МАРС.

Основные требования к проектируемой программе:

1. Возможность блочного проектирования нейронных сетей;
2. Возможность создания персептронов, рекуррентных и сверточных нейросетей;
3. Возможность тонкой настройки слоёв и синапсов;
4. Наличие заготовленных наборов шаблонных нейронных сетей для решения тривиальных задач;
5. Наличие полноценной документации, проясняющую работу каждого отдельного модуля.

В качестве основного языка программирования был выбран язык Python из-за имеющегося опыта интеграции кода Python и кода среды моделирования МАРС.

В результате сравнения различных библиотек машинного обучения языка Python между собой было принято решение что работа над интеграцией машинного обучения в среду моделирования МАРС должна быть выполнена при помощи библиотеки PyTorch.

В результате проектирования было составлено описание элементов, которые необходимо реализовать для выполнения поставленных требований.

Оценка приобретенных компетенций:

ОПК-1: в рамках прохождения учебной практики были использованы знания, полученные раннее в рамках обучения в ВУЗе при проектировании проекта.

ОПК-2: в рамках учебной практики были освоены библиотеки Keras и PyTorch для языка Python.

ОПК-3: в рамках учебной практики был составлен проект реализации блочной архитектуры средства по созданию нейронных сетей.

ОПК-4: в рамках учебной практики было оформлено техническое задание.

ОПК-7: в рамках учебной практики был составлен план по интеграции библиотеки PyTorch в среду моделирования МАРС.

## Список использованных источников

1. Николенко С.И., Кадурин А.А., Архангельская Е.В. Глубокое Обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб: Питер, 2018. 480 с.
2. Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Зайченко Т.Н., Ганджа Т.В. МАРС – среда моделирования технических устройств и систем – Томск: В-Спектр, 2011. 277 с.
3. Deep Learning Toolbox [Электронный ресурс]. URL: https://[www.mathworks.com/products/deep-learning.html](http://www.mathworks.com/products/deep-learning.html) (дата обращения: 25.11.2023).
4. Deep Network Desiner [Электронный ресурс]. URL: https://[www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/deepnetworkdesigner-app.html](http://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/deepnetworkdesigner-app.html) (дата обращения: 25.11.2023).
5. Neural Net Fitting [Электронный ресурс]. URL: https://[www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/neuralnetfitting-app.html](http://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/neuralnetfitting-app.html) (дата обращения: 19.11.2023).
6. NeuroGenetic Optimizer [Электронный ресурс]. URL: https://[www.biocompsystems.com/content/products/analytics/ngo/](http://www.biocompsystems.com/content/products/analytics/ngo/) (дата обращения: 27.11.2023).
7. SimInTech [Электронный ресурс]. URL: https://simintech.ru/ (дата обращения: 10.05.2024).
8. Петрова Е.С., Коновалов Н.А. Обзор библиотек для интеграции кода python в приложение на C++ // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. Томск: В-Спектр, 2023. Ч. 2. С. 121–123.
9. Библиотека TensorFlow [Электронный ресурс]. URL: https://www.tensorflow.org/?hl=ru (дата обращения: 10.05.2024).
10. Библиотека Theano [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/Theano/Theano (дата обращения: 10.05.2024).
11. Библиотека Keras [Электронный ресурс]. URL: https://keras.io/ (дата обращения: 10.05.2024).
12. Библиотека PyTorch [Электронный ресурс]. URL: https://pytorch.org/ (дата обращения: 10.05.2024).
13. Библиотека PyBrain [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/pybrain/pybrain (дата обращения: 10.05.2024).
14. Картер Д. Нейросети. Обработка естественного языка. – М: «Автор», 2023. – 156 с.
15. Документация DearPyGUI [Электронный ресурс]. URL: https://dearpygui.readthedocs.io/en/latest/ (дата обращения: 22.04.2025).