Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Муромский институт (филиал)**

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

**«Владимирский государственный университет   
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**

(МИ ВлГУ)

Факультет Информационных технологий

Кафедра Информационные системы

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Д.Е. Андрианов

(подпись)

«\_\_\_\_\_\_» 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ

РАБОТА

Тема Разработка программы имитационного моделирования моделей .

машинного обучения

МИВУ.09.03.02-05.000 БР

Руководитель

Щаников С.А.

(фамилия, инициалы)

(подпись) (дата)

Студент ИС-117

(группа)

Минеев Р.Р.

(фамилия, инициалы)

(подпись) (дата)

Муром 2021

БЛАНК ЗАДАНИЯ

[Аннотация русскоязычная]

[Аннотация англоязычная]

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Муромский институт (филиал)**

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

**«Владимирский государственный университет   
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**

(МИ ВлГУ)

Факультет Информационных технологий

Кафедра Информационные системы

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ

ЗАПИСКА

Тема: Разработка программы имитационного моделирования моделей .

машинного обучения

МИВУ.09.03.02-05.000 ПЗ

Муром 2021

СОДЕРЖАНИЕ

[ВВЕДЕНИЕ 7](#_Toc74746513)

[1 Анализ технического задания 8](#_Toc74746514)

[1.1 Зачем нейросетям краш-тест 8](#_Toc74746515)

[1.2 Обзор методов организации параллельных вычислений 8](#_Toc74746516)

[1.3 Выбор средства 12](#_Toc74746517)

[1.4 Требования к разрабатываемой программе 13](#_Toc74746518)

[2 Проектирование 15](#_Toc74746519)

[3 Разработка 22](#_Toc74746520)

[4 Тестирование 33](#_Toc74746521)

[4.1 Тест общей работы модуля 33](#_Toc74746522)

[4.2 Анализ производительности в зависимости от входных данных и аппаратных данных устройства 42](#_Toc74746523)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 50](#_Toc74746524)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 51](#_Toc74746525)

# ВВЕДЕНИЕ

Значимость работы, как она может улучшить мир

Имитационное моделирование — ключевая технология в работе с ИИ. Оно особенно полезно при создании системы на основе обучения с подкреплением, для которой сложно или невозможно получить входные данные из реального мира. Этим обусловлена актуальность темы.

Цель данной бакалаврской работы – разработать программу имитационного моделирования моделей машинного обучения при условии изменения данных внутри нейросети.

Задачи, поставленные на бакалаврскую работу:

- произвести обзор предметной области;

- проанализировать методы ускорения процесса обработки нейросетей;

- …

- проанализировать изменение данных внутри нейросетей при различных отклонениях входных параметров и сделать соответствующие выводы.

# 1 Анализ технического задания

# 1.1 Для чего необходимо тестировать нейронную сеть.

Создание искусственных нейронных сетей было вдохновлено из биологическими аналогами – нейронными сетями живых организмов, которые отлично справляются с решением сложно формализуемых и не формализуемых математически задач, таких как распознавание, классификация, кластеризация, обобщение и т.д. Уоррен Мак-Каллок, который был нейрофизиологом, и Уолтер Питс, который был математиком, предложили собственную модель, описывающую процесс функционирования биологических нейронных сетей в упрощенном виде. Френк Розенблат реализовал эту модель аппаратно в виде первого в мире нейрокомпьютера Марк 1 [5]. Однако такой многообещающий старт развития технологии, в которой компьютер не программируется, а обучается выполнению интеллектуальных задач, был внезапно прерван, после опубликования книги “Персептроны” Марвином Минским в 1970-х годах [15].

Развитие нейрокомпьютеров с тех пор было приостановлено, а теория машинного обучения совершенствовалась лишь в области математического аппарата. В это время активное развитие наблюдалось в области программируемой цифровой техники, результаты, которого мы видим в настоящее время: мобильная электроника, персональные компьютеры, специализированные компьютеры для медицины, военной промышленности и т.п. Вся эта техника функционирует на 2 основных принципах:

- архитектура фон-Неймана;

- транзистор, как основной элемент аппаратной реализации.

Совместное использование шины для памяти программ и памяти данных приводит к узкому месту архитектуры фон Неймана, а именно ограничению пропускной способности между процессором и памятью по сравнению с объёмом памяти [16]. Из-за того, что память программ и память данных не могут быть доступны в одно и то же время, пропускная способность канала «процессор-память» и скорость работы памяти существенно ограничивают скорость работы процессора — гораздо сильнее, чем если бы программы и данные хранились в разных местах [7].

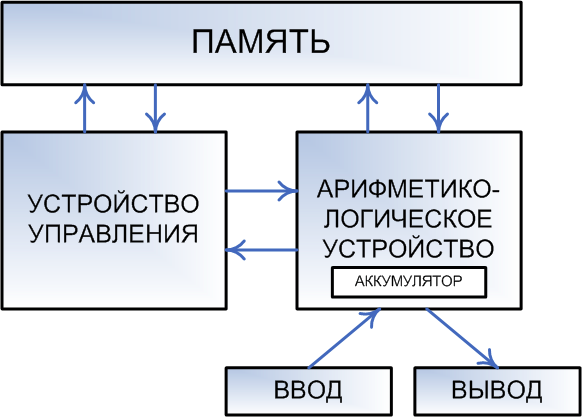
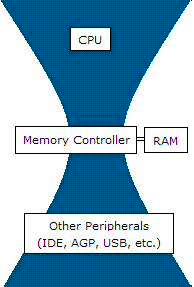
 

Рисунок 1 – Архитектура Фон Неймана и её проблема

Применение транзисторов так же имеет проблемы связанные с масштабированием и нагрево. Проблема масштабирования хорошо описывается законом Мура. Зако́н Му́ра (англ. Moore's law) — эмпирическое наблюдение, изначально сделанное Гордоном Муром, согласно которому (в современной формулировке) количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца {https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD\_%D0%9C%D1%83%D1%80%D0%B0}. В 2007 году Мур заявил, что закон, очевидно, скоро перестанет действовать из-за атомарной природы вещества и ограничения скорости света[7]. Это означает, что в ближайшие годы, для поддержания имеющихся темпов уменьшения размеров транзисторов в процессорах, их размер должен стать меньше размера атома, что физически не возможно.



Рисунок заком Мура.

Другая, вытекающая из данного закона проблема – нарастающее энергопотребление и соответственно нагрев цифровых процессоров. За 50 лет энергопотребление выросло на 2 порядка, что вслечет за собой не только экономические проблемы, вызванные высокими затратами на обслуживание электросетей, но и экологические, вызванным увеличенным расходом теплоносителей.

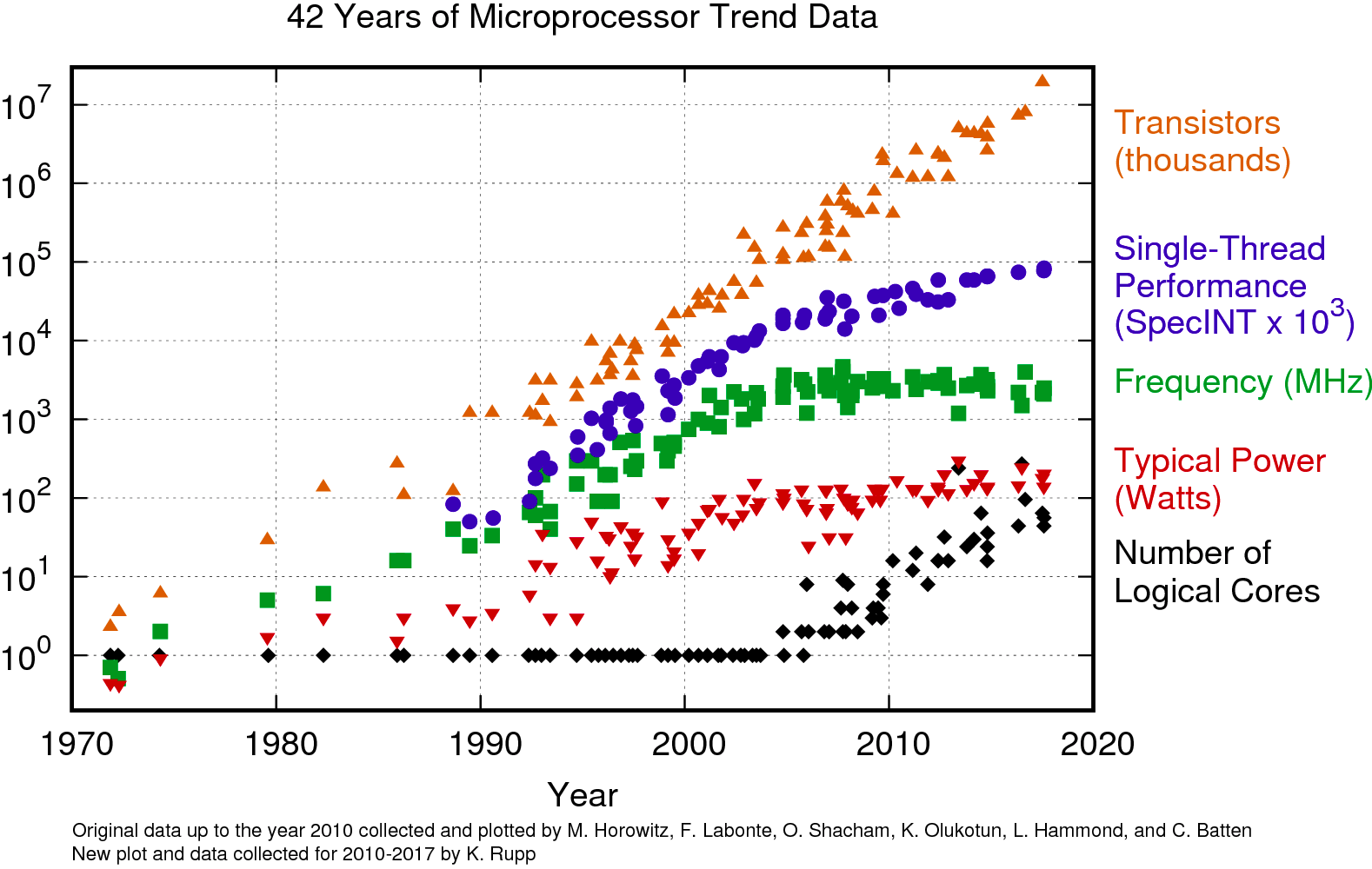


Рисунок – Тренд роста энергопотребления

Альтернативой решения рассмотренных проблем является переход от рассмотренного выше подхода к применению новых парадигм вычисления и новых электронных компонентов. Для этого нужно:

1. Сменить архитектуру вычислений

2. Сменить материалы электронных компонентов.

Как было сказано в выше, искусственные нейронные сети были вдохновлены их биологическими аналогами, и по своей природе они являются параллельными средствами обработки информации. Такой параллелизм можно достигнуть за счет применения большого колличества простых вычислителбных узлов в целом выполняющих одну большую сложную задачу. Поэтому нейросетеввая архитектура в данном случае очень подходит на роль альтернативы архитектуре фон-Неймана. Для аппаратной реализации искусственных нейронных сетей до недавнего времени не было других аналогов кроме эмуляции их работы на цифровой элементной базе. Однако начиная с 2010х годов появилось множество материалов, позволяющих создавать устройства, очень подходящие по своей природе на роль аппаратных нейросетей.

Рассматриваемые материалы – это переменные резисторы на основе тонких пленок различных диэлеткриков. Из них делают новые виды оперативной памяти – ReRAM. ReRAM. Очень пододит для аппаратной реализации нейронныых сетей, так как отдельная ячейка памяти может выполнять умножение на весовой коэффициент по закону Ома, что значительно увеличит быстроджействие и снизит энергопотреблемние интеллекуальных систем.

Картинка из презентации про РеРАМ и инмемори

Однако достигнутое на этапе компьютерного проектирования номинальное качество работы ИНС снижается в реальных условиях эксплуатации при реализации ан ReRAM во многих случаях до полной потери работоспособности из-за аналогового принципа обработки информации. Причиной этого является неизбежное влияние внутренних и внешних физических и информационных дестабилизирующих факторов, а также производственных и эксплуатационных погрешностей значений параметров элементов и платформы их реализации.

В связи с вышесказанным, актуальными являются исследования, направленные на разработку автоматизированных инженерных методов проектирования высоконадежных ИНС, позволяющих приблизить технические параметры и характеристики ИНС к их потенциально достижимым значениям.

# 1.2 Обзор методов организации параллельных вычислений

Необходимость разделять вычислительные задачи и выполнять их одновременно (параллельно) возникла задолго до появления первых вычислительных машин.

Существует 3 метода распараллеливания расчетов:

- распараллеливание по задачам (такое распараллеливание актуально для сетевых серверов и других вычислительных систем, выполняющих одновременно несколько функций либо обслуживающих многих пользователей);

- распараллеливание по инструкциям (аппаратно реализовано в современных центральных процессорах общего назначения, поскольку оно эффективно при исполнении программ, интенсивно обменивающихся разнородной информацией с другими программами и с пользователем компьютера);

- распараллеливание по данным.

Потоковая обработка данных особенно эффективна для алгоритмов, обладающих следующими свойствами, характерными для задач физического и математического моделирования:

- большая плотность вычислений — велико число арифметических операций, приходящихся на одну операцию ввода-вывода (например, обращение к памяти). Во многих современных приложениях обработки сигналов она достигает 50:1, причем со сложностью алгоритмов увеличивается;

- локальность данных по времени - каждый элемент загружается и обрабатывается за время, малое по отношению к общему времени обработки, после чего он больше не нужен. В результате в памяти потокового процессора для каждого «вычислителя» можно хранить только данные, необходимые для обработки одного элемента, в отличие от центральных процессоров с моделью произвольно зависимых данных.

Со времени своего появления в начале 1980‑х годов, персональные компьютеры развивались в основном как машины для выполнения программ, сложных по внутренней структуре, содержащих большое количество ветвлений, интенсивно взаимодействующих с пользователем, но редко связанных с потоковой обработкой большого количества однотипных данных. Центральные процессоры ПК оптимизировались для решения именно таких задач, поэтому характеризовались следующим:

- большим количеством блоков для управления исполнением программы (кеширование данных, предсказание ветвлений и т.п.) и сравнительно малым количеством блоков для вычислений;

- архитектурой, оптимальной для программ со сложным потоком управления (обработка разнородных команд и данных, организация взаимодействия программ между собой и с пользователем);

- памятью с максимальной скоростью произвольного доступа к данным.

Увеличение производительности CPU в основном было связано с увеличением тактовой частоты и размеров высокоскоростной кеш-памяти (память, расположенная прямо на процессоре). Программирование CPU для ресурсоемких научных вычислений подразумевает тщательное структурирование данных и порядка инструкций для эффективного использования всех уровней кеш-памяти.

Ядра современных центральных процессоров являются суперскалярными, поддерживая векторную обработку (расширения SSE и 3DNow!), сами же CPU обычно содержат несколько ядер. Таким образом, в совокупности центральные процессоры могут реализовывать десятки параллельных вычислительных потоков. Однако графические процессоры включают в себя тысячи параллельных «вычислителей». Кроме того, при поточно-параллельных расчетах графические процессоры имеют преимущество благодаря следующим особенностям архитектуры:

- память GPU оптимизирована на максимальную пропускную способность (а не на скорость произвольного доступа, как у CPU), что ускоряет загрузку потока данных;

- большая часть транзисторов графического процессора предназначена для вычислений, а не для управления исполнением программы;

- при запросах к памяти, за счет конвейерной обработки данных, не происходит приостановки вычислений.

Однако обработка ветвлений (исполнение операций условного перехода) на GPU менее эффективна, поскольку каждый управляющий блок обслуживает не один, а несколько вычислителей.

Таким образом, производительность одного GPU при хорошо распараллеливаемых вычислениях аналогична кластеру из сотен обычных вычислительных машин, причем графические процессоры сейчас поддерживают практически все операции, используемые в алгоритмах общего назначения:

- распространенные математические операции и функции вещественного аргумента. В рамках SM 4.0 поддерживаются целые числа и логические операции, а в SM 4.1 и CUDA — также и вещественные числа двойной (64‑битной) точности;

- организацию циклов. В SM 3 длина циклов ограничена 255 итерациями, в SM 4 длина циклов не ограничена;

- операции условного перехода (которые исполняются сравнительно медленно, поскольку в составе GPU блоков управления меньше, чем вычислительных блоков).

В различных источниках информации можно найти много разных определений процессов и потоков. Такой разброс определений обусловлен, во-первых, эволюцией операционных систем, которая приводила к изменению понятий о процессах и потоках, во-вторых, различием точек зрения, с которых рассматриваются эти понятия.

С точки зрения пользователя, процесс — экземпляр программы во время выполнения, а потоки — ветви кода, выполняющиеся «параллельно», то есть без предписанного порядка во времени.

С точки зрения операционной системы, процесс — это абстракция, реализованная на уровне операционной системы. Процесс был придуман для организации всех данных, необходимых для работы программы. Процесс — это просто контейнер, в котором находятся ресурсы программы:

- адресное пространство;

- потоки;

- открытые файлы;

- дочерние процессы и т.д.

Также, с точки зрения операционной системы, поток — это абстракция, реализованная на уровне операционной системы. Поток был придуман для контроля выполнения кода программы. Это контейнер, в котором находятся:

- счётчик команд;

- регистры;

- стек.

Поток легче, чем процесс, и создание потока стоит дешевле. Потоки используют адресное пространство процесса, которому они принадлежат, поэтому потоки внутри одного процесса могут обмениваться данными и взаимодействовать с другими потоками.

Поддержка множества потоков внутри одного процесса в рамках работы над разрабатываемой программой необходима. В случае, когда одна программа выполняет множество задач, поддержка множества потоков внутри одного процесса позволяет:

- разделить ответственность за разные задачи между разными потоками;

- повысить быстродействие.

Кроме того, часто задачам необходимо обмениваться данными, использовать общие данные или результаты других задач. Такую возможность предоставляют потоки внутри процесса, так как они используют адресное пространство процесса, которому принадлежат. Конечно, можно было бы создать под разные задачи дополнительные процессы, но:

- у процесса будет отдельное адресное пространство и данные, что затруднит взаимодействие частей программы;

- создание и уничтожение процесса дороже, чем создание потока.

Отличие процесса от потока состоит в том, что процесс рассматривается операционной системой, как заявка на все виды ресурсов (память, файлы и пр.), кроме одного — процессорного времени. Поток — это заявка на процессорное время. Процесс — это всего лишь способ сгруппировать взаимосвязанные данные и ресурсы, а потоки — это единицы выполнения, которые выполняются на процессоре.

# 1.3 Выбор средства

Для разработки программы были выбраны следующие средства:

1) язык программирования Python;

2) модуль Threading;

3) модуль Multiprosessing.

Язык программирования Python был выбран исходя из того, что данный язык часто используется для написания нейросетей.

В случае с разработкой данной системы использование потоков не подойдет, так как Python имеет GIL.

GIL (Global Interpreter Lock) – это своеобразная блокировка, позволяющая только одному потоку управлять интерпретатором Python. Это означает, что в любой момент времени будет выполняться только один конкретный поток.

Работа GIL может казаться несущественной для разработчиков, создающих однопоточные программы. Но во многопоточных программах отсутствие GIL может негативно сказываться на производительности процессоро-зависимых программ.

Модуль Threading впервые был представлен в Python 1.5.2 как продолжение низкоуровневого модуля потоков. Модуль Threading значительно упрощает работу с потоками и позволяет программировать запуск нескольких операций одновременно. Потоки в Python лучше всего работают с операциями ввода/вывода, такими как загрузка ресурсов из интернета или чтение файлов на компьютере.

Модуль Multiprocessing был добавлен в Python версии 2.6. Изначально он был определен в PEP 371 Джесси Ноллером и Ричардом Одкерком. Модуль Multiprocessing позволяет создавать процессы таким же образом, как при создании потоков при помощи модуля Threading. Использование данного модуля позволяет обойти GIL и воспользоваться возможностью использования нескольких процессоров на компьютере.

# 1.4 Требования к разрабатываемой программе

На вход разрабатываемой программе должна поступать модель нейронной сети, а также тестовые значения алгоритма рандомизации данных.

Разрабатываемая программа должна иметь следующие функции:

- функцию загрузки модели из класса программы (а также, описание входных данных тестирования нейронной сети: на чем она обучалась, каким образом загружается тестовая выборка);

- функция определения и вывода временных данных (например, весов нейросетей на всех эпохах обучения);

- функция загрузки полученных данных в исходную модель (таким образом создается новая модель, с новыми данными);

- функция, возвращающая показатели нейросети (точность или расхождение) после проверки модели.

Задачей разрабатываемой программы является повышение скорости расчётов большого количество данных (большого количества тестов, которые будут проводиться для модели нейронной сети).

На выходе пользователь программы должен получать график и возможность сохранения готового ответа, выданного программой.

Добавить картинок

# 2 Проектирование

На рисунке … представлено различие между последовательной схемой решения (верхняя часть схемы) и способом распределенных вычислений (нижняя часть схемы). Последовательная схема решения в данном случае не подходит, так как предполагается довольно большой объем обрабатываемых данных, который займет больше времени на обработку из-за низкой эффективности. В данном случае процессор не будет на 100% загружен нашей задачей.

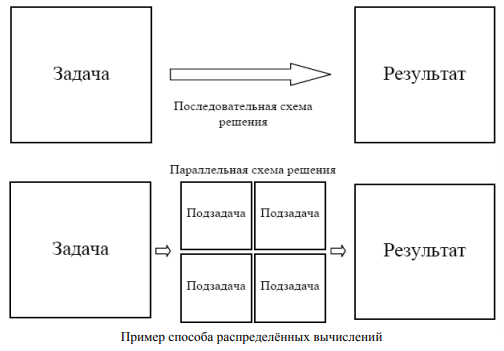


Рисунок … - Схема последовательных и распределенных вычислений

Процессор компьютера, на котором производится разработка программы, содержит 12 ядер. В процессе тестирования работы программы будут использоваться все ядра системы. Таким образом, теоретически, производительность программы должна вырасти.

Для генерации случайных значений весов будут использоваться функции нормального распределения и равномерного распределения. Функцию, с которой будет работать модель, выбирает пользователь.

Нормальным называется распределение вероятностей, которое для одномерного случая задаётся функцией Гаусса.

Нормальное распределение играет важнейшую роль во многих областях знаний. Случайная величина подчиняется нормальному закону распределения, когда она подвержена влиянию большого числа случайных факторов, что является типичной ситуацией в анализе данных. Поэтому нормальное распределение служит хорошей моделью для многих реальных процессов.

Нормальное распределение зависит от 4-х параметров:

- математическое ожидание - «центр тяжести» распределения;

- дисперсия - степень разброса случайной величины относительно математического ожидания;

- коэффициент асимметрии - параметр формы распределения, определяющий его симметрию относительно математического ожидания;

- коэффициент эксцесса - параметр распределения, задающий «остроту» пика распределения.

Типичные формы нормального распределения для различных средних и дисперсии представлены на рисунке …:

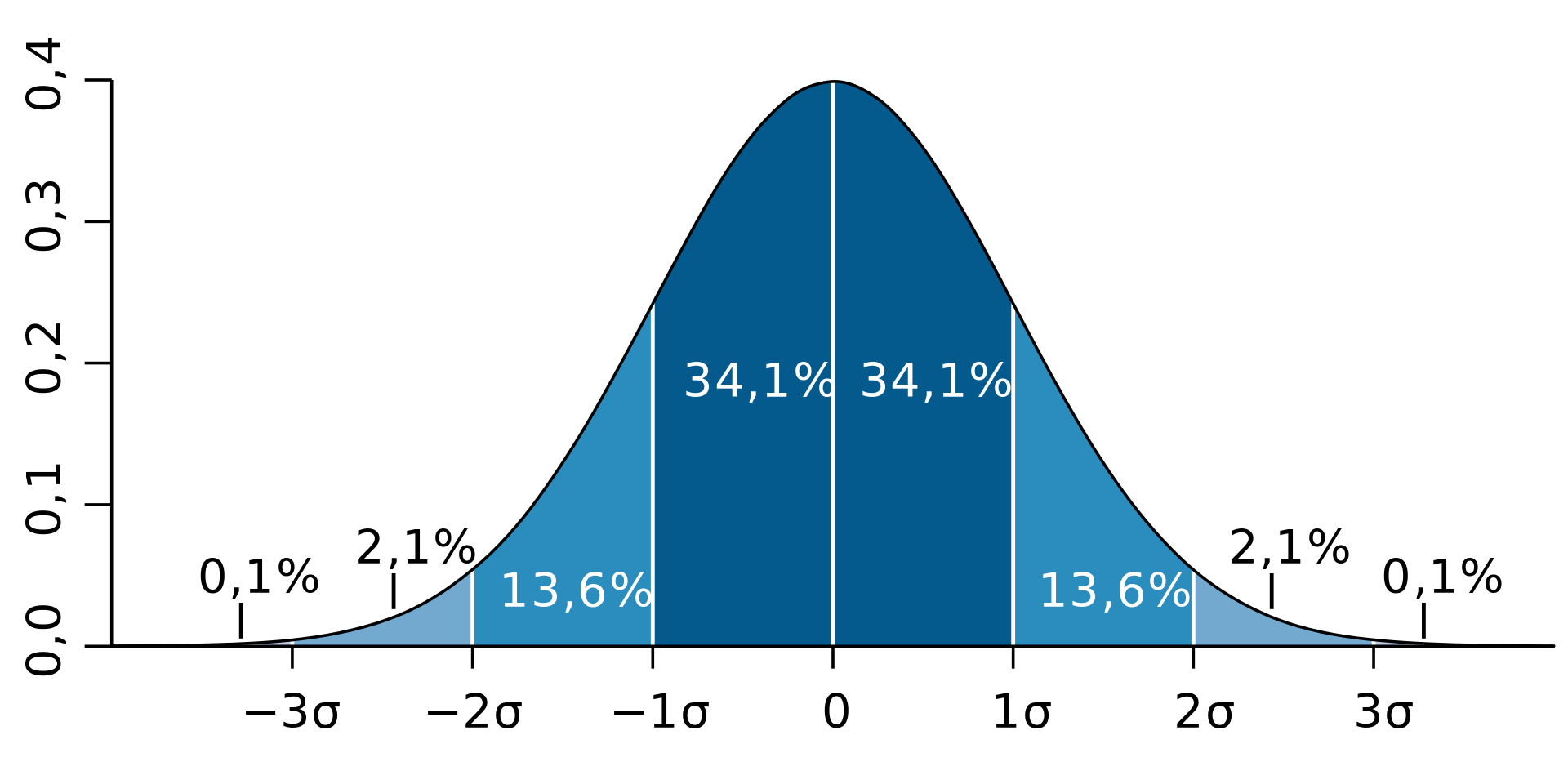


Рисунок … - Примеры форм нормального распределения

Формула данной функции – формула (1):

(1)

где *μ* — математическое ожидание;

*σ*2 — дисперсия.

Коэффициент асимметрии определяется по следующей формуле (2):

(2)

Если коэффициент асимметрии положителен, то правый «хвост» распределения длиннее левого, и отрицателен в противном случае. Если распределение симметрично относительно математического ожидания, то его коэффициент асимметрии равен нулю.

Коэффициент эксцесса вычисляется по формуле 3:

(3)

Равномерным распределением непрерывной случайной величины называется распределение, в котором значения случайной величины с двух сторон ограничены и в границах интервала имеют одинаковую вероятность. Это означает, что в данном интервале плотность вероятности постоянна.

Таким образом, при равномерном распределении плотность вероятности рассчитывается по формуле (4):

(4)

Значения *f*(*x*) в крайних точках a и b участка (a, b) не указываются, так как вероятность попадания в любую из этих точек для непрерывной случайной величины равна нулю.

Кривая равномерного распределения имеет вид прямоугольника, опирающегося на участок (*a, b*) (рисунок …), в связи с чем равномерное распределение иногда называют «прямоугольным».

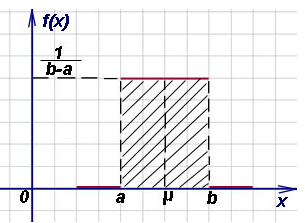


Рисунок … - График кривой равномерного распределения

Функция распределения *F*(*x*) непрерывной случайной величины при равномерном распределении рассчитывается по формуле (5):

(5)

Характеристиками равномерного распределения являются:

- среднее значение (математическое ожидание) по формуле (6):

; (6)

- дисперсия по формуле (7):

; (7)

- стандартное отклонение по формуле (8):

. (8)

Описав алгоритмы, которыми будут обрабатываться веса нейронной сети, имитируя погрешность аналогового сигнала, можно перейти к проектированию общей схемы работы программы (рис…).

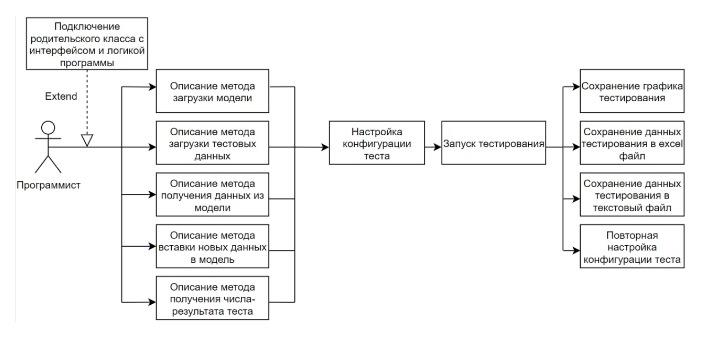


Рисунок … - Схема работы программы

Отсюда видно, что пользователь программы – это программист, перед которым стоит задача написать свой класс, унаследованный от родительского класса, в разрабатываемой программе. Работа с программой начинается с подключения родительского класса с интерфейсом и логикой программы. В данном случае это файл с расширением py и несколько библиотек, для отрисовки интерфейса и многопроцессорной обработки. Для работы программы пользователю необходимо выполнить следующие действия:

- описывает метод загрузки модели (загрузка обученной модели для последующего тестирования);

- описывает метод загрузки тестовых данных (либо загружает готовые данные (изображения, сигналы и т.д.), либо описывает код-генератор тестовых данных);

- описывает метод получения данных из модели (данные (веса и пр.), которые будут изменяться в зависимости от выбранного алгоритма рандомизации данных);

- описывает метод загрузки новых данных в модель;

- описывает метод получения числа – результата теста (вывод точности распознавания, расчет ошибки при распознавании или др.).

Далее происходит настройка конфигурации теста, в процессе которой пользователь задает следующие параметры:

- количество ядер, которые будут задействованы в процессе работы программы (данная характеристика ограничена числом ядер, имеющихся в системе, по умолчанию выбрано максимальное количество);

- алгоритм обработки данных (нормальное распределение, равномерное распределение или распределение Пуассона);

- список значений для алгоритма генерации случайных чисел.

Генерация последнего параметра происходит при помощи 4-х данных:

- начального значения (по умолчанию - 0);

- конечного значения;

- шага;

- количества тестов на каждом шаге (в процессе тестирования полученные данные усредняются для отображения наиболее приближенного).

Далее происходит сам процесс тестирования, после чего на экране программы отображается график, отражающий результат тестирования.

После этого пользователь может сделать следующее:

- сохранить полученный в результате тестирования график в виде изображения;

- сохранить полученные данные тестирования в файл .xlsx;

- сохранить полученные данные тестирования в текстовый файл;

- повторно настроить конфигурацию теста.

На рисунке … приведена диаграмма последовательности, которая описывает последовательность работы пользователя в программе.

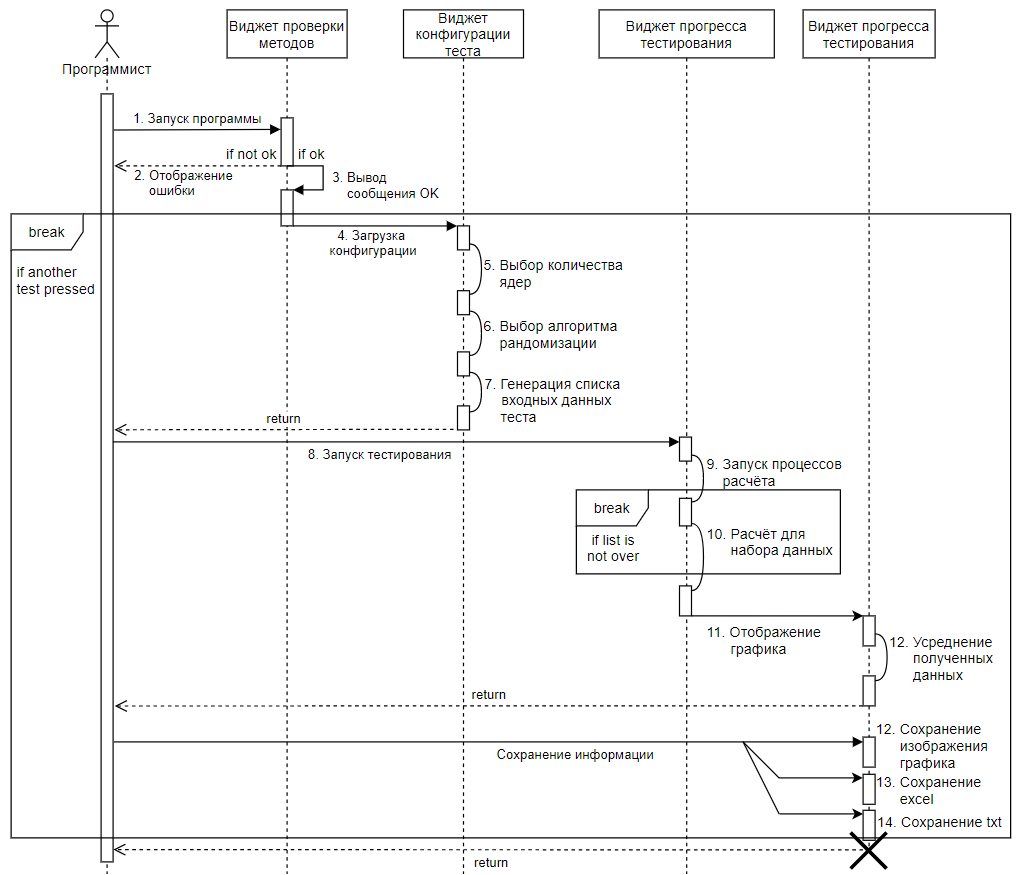


Рисунок … - Диаграмма последовательности

На данном этапе процесс проектирования можно считать завершенным. Следующий этап – разработка программы.

# 3 Разработка прораммы

В данном разделе пояснительной записки описан процесс разработки программы имитационного моделирования моделей машинного обучения.

Проверка функций, которые необходимо описать пользователю, производится следующим образом:

- метод load\_model не должен содержать синтаксических ошибок и должен возвращать объект модели, которую пользователю необходимо протестировать;

- метод load\_testdata должен вернуть переменную, которая является списком и хранит в себе элемент, являющийся тестовой выборкой, и элемент, хранящий правильное поведение модели на каждый из элементов тестовой выборки;

- метод get\_tested\_values содержит описание процесса выгрузки значений весов из модели, которую загрузил пользователь в методе load\_model;

- метод set\_tested\_values загружает новые веса, которые были получены в методе get\_tested\_values, в модель и вернёт ошибку если не было загружено данных, либо метод get\_tested\_values не вернул ожидаемые функцией set\_tested\_values переменные;

- методу test\_model необходимо взаимодействовать со всеми описанными ранее функциями, поэтому если на одном из них произошла ошибка, то и на данном методе возникнет ошибка.

Код проверки модуля load\_model представлен ниже:

try:

if self.name == 'load\_model':

self.neuralconfig.load\_model()

try:

pickle.dumps(self.neuralconfig.model)

except TypeError:

raise PickleProblem

except PickleProblem:

self.function\_checked\_signal.emit(self.name, 'ERROR')

self.error\_signal.emit('Your model is not pickleable.\nTry to pickle your model before launch the program', self.name)

except Exception as e:

self.function\_checked\_signal.emit(self.name, 'ERROR')

self.error\_signal.emit(str(e), self.name)

self.return\_new\_state.emit(self.neuralconfig)

self.done.emit()

Как можно увидеть из данного кода программы, данная функция выведет сообщение об ошибке, если:

- метод load\_model не описан (его не существует);

- в коде этого метода обнаружена синтаксическая ошибка;

- модель нельзя представить в байтовом виде.

Модуль Multiprocessing (стандартная библиотека Python) выполняет функцию распределения полученных данных на процессы, поэтому все данные, которые нужны для выполнения функции, должны иметь возможность быть представлены в байтовом виде. Таким образом, если модель, загруженная пользователем, не может быть переведена в байтовый вид, пользователь увидит сообщение об ошибке.

Далее проверяется функция load\_testdata. Если метода нет, либо он содержит синтаксическую ошибку, выводится сообщение об ошибке. В данном методе должна быть описана переменная self.testdata. Если она будет описана неправильно, сообщение об ошибке выведет проверка метода test\_model.

Следующая на очереди – проверка метода get\_tested\_values, которая также вернет ошибку при наличии синтаксической ошибки либо отсутствии данного метода, которое повлечёт за собой ошибку следующего метода.

После этого происходит проверка метода set\_tested\_values. Программа уведомит пользователя об ошибке, если метод не сможет подставить в модель данные, которые вернул метод get\_tested\_values.

Последняя проверка - работа метода test\_model. Его задача - подставить модель из метода set\_tested\_values и данных из метода load\_testdata, и вернуть ошибку, если на каком-либо из этих этапов произойдет сбой. А также этот метод должен вернуть одно число, обозначающее точность модели на заданной выборке.

Если ошибок не обнаружено, происходит загрузка виджета настройки конфигурации тестов. Пользователь выбирает количество используемых ядер и алгоритм распределения данных, а также задает настройки списка значений для генерации ряда случайных чисел: начальное и конечное значения, шаг и число, отражающее количество тестов на каждом шаге.

Код генерации ряда случайных чисел следующий:

def update\_config(self):

numbers = [edit.text() for edit in self.line\_edits]

try:

start = float(numbers[0])

stop = float(numbers[1])

step = float(numbers[2])

ntes = int(numbers[3])

except ValueError:

self.setError('Wrong numbers')

return

self.config = np.arange(start, stop, step)

self.config = np.around(self.config, 6)

if ntes > 1:

self.config = np.repeat(self.config, ntes)

if len(self.config) > 8:

self.preview.setText('[' + ', '.join(list(map(str, self.config[:3]))) + ', ..., ' + ', '.join(list(map(str, self.config[-3:]))) + '] | ' + str(len(self.config)) + ' values')

else:

self.preview.setText('[' + ', '.join(list(map(str, self.config))) + ']')

self.config\_changed.emit()

На данном этапе происходит проверка введенных пользователем данных. Возможно возникновение следующих ошибок:

- введены не числа;

- конечное число ряда меньше, чем начальное;

- шаг меньше или равен 0;

- количество тестов меньше 1.

Хранением и выполнением алгоритмов генерации случайных чисел занимается класс GeneratingRandomAlgorithms. Его код представлен ниже:

class GeneratingRandomAlgorithms():

names = ['normal', 'uniform',]

def generate(self, weight, value):

if self.algorithm == 'normal':

return self.\_random\_numpy\_normal(weight, value)

elif self.algorithm == 'uniform':

return self.\_random\_numpy\_uniform(weight, value)

def \_random\_numpy\_normal(self, weight, sigma):

return [np.random.normal(array, sigma) for array in weight]

def \_random\_numpy\_uniform(self, weight, deviation):

def generate\_number(number):

return number + np.random.uniform(-deviation, deviation, size=1)

return [generate\_number(array) for array in weight]

В зависимости от выбранного алгоритма (Normal, Uniform), будет сохранена информация о названии параметра данного алгоритма (sigma, deviation соответственно) и выполнен соответствующий метод (\_random\_numpy\_normal, \_random\_numpy\_uniform соответственно).

Далее пользователь запускает процесс тестирования, что вызывает загрузку виджета прогресса тестирования и старт самого тестирования. Происходит процесс передачи конфигурации данных в класс MultiprocessExecution. Далее вызывается метод multiprocessingCalc, который поделить все входные данные на одинаковые части для каждого процесса и запустит параллельное вычисление. Код данного класса представлен ниже:

class MultiprocessExecution():

def \_\_init\_\_(self, data, neuralconfig, shm\_name):

self.data = data

self.neuralconfig = neuralconfig

self.shm\_name = shm\_name

def multiprocessingCalc(self):

values = self.data['config']

cpu\_count = self.data['processors']

process\_step = ceil(len(values) / cpu\_count)

list\_in\_data = list()

for i in range(ceil(len(values) / process\_step)):

end = i \* process\_step + process\_step if i + process\_step <= len(values) else len(values)

start = i \* process\_step

list\_in\_data.append(values[start:end])

with multiprocessing.get\_context("spawn").Pool(cpu\_count) as p:

data = p.map(self.\_compute\_models, list\_in\_data)

return data

Поступившие данные конфигурации делятся на части, равные количеству ядер, которые были заданы пользователем, с последующим запуском функции \_compute\_models для каждой из этих частей. Каждый раз, когда функция \_compute\_models выполняет расчет для новой модели, она прибавляет 1 к общему прогрессу рассчитанных моделей, что в последующем можно использовать для отображения прогресса пользователю. Для этого используется класс ShareableList библиотеки Multiprocessing. Он позволяет иметь доступ к одной ячейке памяти для всех процессов, которые в данный момент выполняются программой.

Каждый процесс для каждого числа берет следующее число из списка данных, выполняет функцию генерации новых значений модели, тем самым создавая новую модель. Происходит расчет модели на тестовых данных, заданных пользователем, и сохранение пары «значение-результат».

После окончания работы всех процессов все данные собираются в общий список и передаются в виджет отображения результатов тестирования.

При создании данного виджета происходит сбор и расчет данных для построения графика – результата тестирования. Код расчета данных для построения графика следующий:

def getXY\_values(self):

XY\_data = {}

for lst in self.data:

for sigma\_result in lst:

if sigma\_result[0] in XY\_data:

XY\_data[sigma\_result[0]].append( \

sigma\_result[1])

else:

XY\_data[sigma\_result[0]] = [sigma\_result[1]]

del(sigma\_result)

for key in XY\_data.keys():

# counting Y

XY\_data[key] = np.average(XY\_data[key])

self.data = XY\_data

В случаях, когда пользователем было указано количество тестов больше 1, при расчете координат точек графика, каждый полученный результат в рамках одного диапазона данных усредняется при помощи операции нахождения среднего арифметического функцией описанной в библиотеке numpy.

Отображение полученного графика в окне программы реализовано средствами библиотеки Matplotlib:

def getGraph(self):

matplotlib.use('Qt5Agg')

sc = MplCanvas(self, width=5, height=5, dpi=100)

sc.axes.plot(list(self.data.keys()), list(self.data.values()))

sc.axes.set\_xlabel( \

self.algorithm.value\_name.capitalize() + ' (numpy.' + self.algorithm.algorithm + ')')

sc.axes.set\_ylabel('Test results')

sc.axes.set\_title(self.name + ' | ' + self.test\_time)

toolbar = NavigationToolbar2QT(sc, self)

sc.fig.tight\_layout()

return toolbar, sc

В данном коде происходит создание графика. Параллельно оси X будет отображаться название алгоритма, при помощи которого была осуществлена генерация случайных чисел с соответствующим названием параметра этого алгоритма. Название графика отображается вверху графика и представляет собой название модели, заданное пользователем, а также включает в себя дату и время окончания тестирования.

Далее пользователь может либо сохранить график в виде изображения, либо вывести данные графика в текстовом виде или в формате .xlsx, либо продолжить работу с программой с другой конфигурацией теста. Сохранение в формат .xlsx реализовано при помощи библиотеки Openpyxl. Данная библиотека также распространяется свободно и способна сохранять таблицы включая самую последнюю версию Excel. При сохранении в этот формат в файл сохраняются следующие данные:

- название модели, заданное пользователем (если название не задано, по умолчанию модели будет присвоено название «NoName»);

- дата и время окончания тестирования;

- значение, которое вернул метод test\_model, на неизмененной модели, загруженной методом load\_model, и тестовых данных, загруженных методом load\_testdata;

- выбранный пользователем алгоритм распределения данных;

- список данных, полученных в результате выполнения тестирования, в виде пары «значение-результат».

Код данного метода представлен ниже:

ws.cell(row=1, column=1).value = 'Name of model: ' + self.\_data['name']

ws.cell(row=2, column=1).value = 'Tested: ' + self.\_data['time']

ws.cell(row=3, column=1).value = 'Your model tested value: ' + str(self.\_data['test\_value'])

ws.cell(row=4, column=1).value = 'Generating random algorithm: numpy.' + self.\_data['algorithm'].algorithm

ws.cell(row=6, column=1).value = self.\_data['algorithm'].value\_name.capitalize()

ws.cell(row=6, column=2).value = 'Tested value'

Из кода выше видно, что происходит добавление в файл xlsx, которым является переменная ws. В каждую строку записываются данные из переменной data, которая была посчитана с помощью класса MultiprocessExecution.

Аналогичным образом производится сохранение результатов тестирования в текстовый файл. Для этого используется стандартный метод open языка python, который способен создавать файлы любого расширения и свободно редактировать информацию в них.

Далее пользователю предоставляется возможность выполнить повторное тестирование с другой конфигурацией над той же моделью.

# 4 Тестирование

# 4.1 Тест общей работы модуля

Для тестирования работы программы используются методы библиотеки Tensorflow. Была создана модель – классификатор стандартного датасета библиотеки Tensorflow – Fashion-MNIST.

Работа начинается с подключения разработанного модуля и описания дочернего от этого модуля класса. Тест-кейсом будет проверка загрузки модели Fashion-MNIST.

class NeuralCrashTest(NeuralCrash):

def \_\_init\_\_(self):

super().\_\_init\_\_()

def load\_model(self):

self.model = load\_model('../2 II Creation/fashion\_mnist.h5')

def load\_testdata(self):

(\_, \_), (testX, testY) = fashion\_mnist.load\_data()

testX = testX.reshape(testX.shape[0], 784) / 255

self.testdata = testX, testY

def get\_tested\_values(self):

return self.model.get\_weights()

def set\_tested\_values(self, values):

new\_model = self.model

new\_model.set\_weights(values)

return new\_model

def test\_model(self, model, data):

results = model.evaluate(data[0], data[1], batch\_size=64)

return results[-1]

В данном коде происходит создание дочернего класса NeuralCrashTest от родительского класса NeuralCrash. В данном классе описаны пять методов, требующиеся для корректной работы программы, и один метод инициализирующий код создания объекта класса NeuralCrash.

После вызова метода run у родительского класса происходит создание интерфейса с проверкой написанных ранее методов.

Попробуем специально исказить написанные методы, чтобы произошло событие отображения ошибок.

def load\_model(self):

self.model = load\_model('../2 II Creation/fashion\_mnist.h5')

В вышеприведенном коде попробуем заменить путь к модели на следующий:

def load\_model(self):

self.model = load\_model('../2 II Creation/fashion\_mnist\_notModel.h5')

Класс проверки корректно обработал ошибку, что отображено на рисунке…

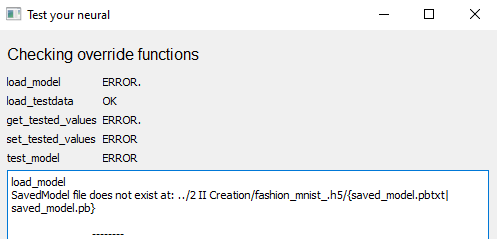


Рисунок … - Виджет обработки ошибок

Данное окно (рис…) показывает, что пользователь совершил ошибку в момент описания метода load\_model, что повело за собой появление ошибок и в других методах, которые прямо зависят от load\_model (get\_tested\_values, set\_tested\_values, test\_model).

Далее необходимо проверить еще один важный момент. Модель должна иметь возможность быть приведена в двоичный вид библиотекой pickle. Если данной возможности нет, то данный виджет обработки ошибок также предупредит об этом пользователя. Это отображено на рисунке…

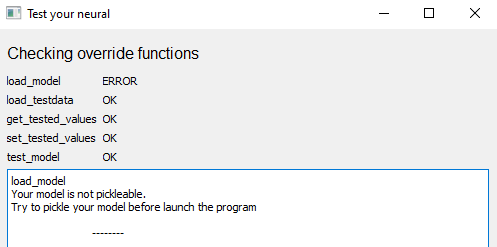


Рисунок … - Обработка ошибки метода pickle

В данном случае, чтобы исправить данную ошибку, необходимо для библиотеки tensorflow, модель которого мы пытаемся загрузить, переописать методы deserialize и serialize. Это приведено в коде ниже:

def unpack(model, training\_config, weights):

restored\_model = deserialize(model)

if training\_config is not None:

restored\_model.compile(

\*\*saving\_utils.compile\_args\_from\_training\_config(

training\_config))

restored\_model.set\_weights(weights)

return restored\_model

def make\_keras\_picklable():

def \_\_reduce\_\_(self):

model\_metadata = saving\_utils.model\_metadata(self)

training\_config=model\_metadata.get("training\_config", None)

model, weights = serialize(self), self.get\_weights()

return (unpack, (model, training\_config, weights))

cls, cls.\_\_reduce\_\_ = Model, reduce\_\_

make\_keras\_picklable()

После вызова данного кода, модель стало возможно использовать в программе. После успешной проверки всех остальных методов происходит отображения виджета настройки конфигурации теста. Его внешний вид показан на рисунке…

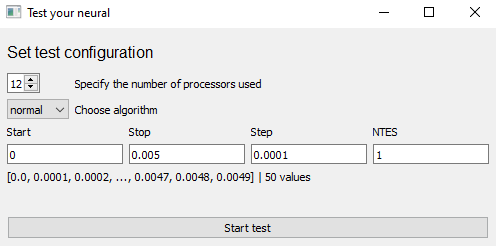


Рисунок … - Виджет настройки конфигурации теста

При создании данного виджета (рис…) во все элементы управления расставляются значения по умолчанию:

- количество ядер процессора равно максимальному значению, определенного системой;

- алгоритм рандомизации данных - normal;

- старт, стоп, шаг и количество тестов - 0, 0.005, 0.0001, 1 соответственно.

Каждое изменение значений списка данных для теста повлечет за собой обработку события update\_config, которое проверит возможность создания списка с данными параметрами, а также отобразит ошибку в противном случае.

Примеры ошибок, которые может совершить пользователь при конфигурации списка, представлены на рисунке …

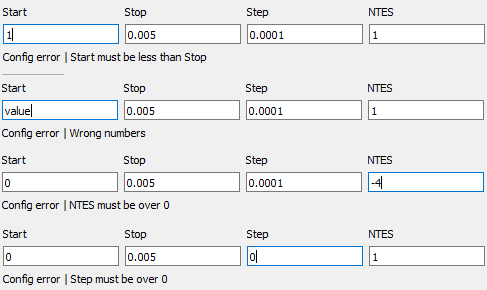


Рисунок … - Обработка ошибок при конфигурации списка входных данных теста

Далее происходит процесс запуска теста, где задача разбивается на подзадачи и отправляется на выполнение каждая в свой процесс. Количество таких подзадач пользователь задал в элементе управления для выбора количества ядер процессора.

Пользователю отображается виджет отображения прогресса тестирования (рис…) с процентным индикатором выполнения общей задачи, а также примерное время до конца тестирования. Это время в начале будет иметь непостоянное значение, так как не будет достаточно данных для проведения точного анализа времени выполнения одной задачи. С каждым запросом на новое отображение прогресса считается новое время выполнения задачи и производится расчёт оставшегося времени до конца тестирования.

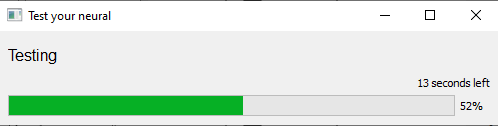


Рисунок … - виджет отображения прогресса тестирования

Работу программы на данном этапе можно отследить отладчиком кода (рис…), либо с помощью диспетчера задач Windows (рис…).

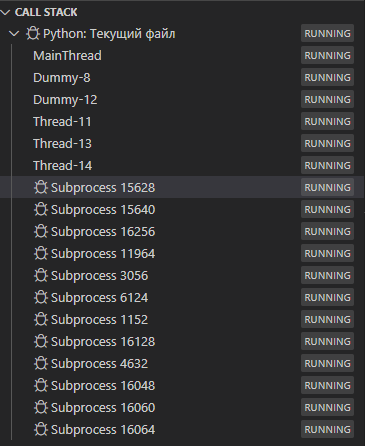


Рисунок … - Отображение созданных процессов в отладчике кода VS Code

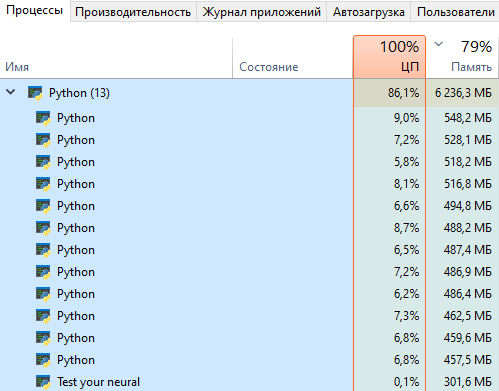


Рисунок … - Отображение созданных процессов в диспетчере задач Windows

Из рисунков … и … можно заметить, что тестирование запустилось на 12-ти ядрах процессора и заняло работу процессора системы на 100%. Каждый из процессов занимает равное количество процессорного пространства и выполняет расчёты параллельно. Из этого можно сделать вывод о том, что программа разделила задачу на подзадачи, количество которых было сконфигурировано пользователем. Скорость тестирования выросла, но также выросла и нагрузка на систему (как на процессор, так и на оперативную память). Для успешного завершения расчётов необходимо подождать некоторое время (в зависимости от конфигурации тестов и размера модели).

После успешного тестирования на экране отображается виджет результатов тестирования с графиком результатов и кнопками для сохранения в файлы различных расширений (\*.xlsx, \*.txt) (рис…).

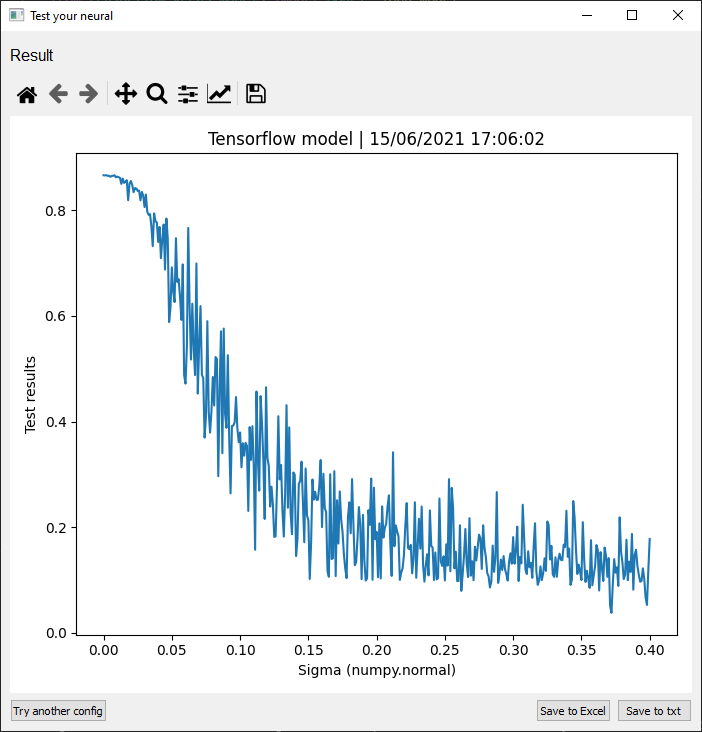


Рисунок … - Виджет отображения результатов тестирования

Как видно из рисунка… , модель с названием «Tensorflow model» была успешно протестирована (рядом верно установлена дата окончания тестирования) с обработкой значений алгоритмом numpy.normal. На графике по оси Х отражается значение sigma, а по оси Y – рассчитанные точности созданных во время тестирования моделей.

Необходимо проверить работу и других алгоритмов. Было проведено тестирования работы алгоритма uniform с параметром deviation. Необходимо задать новую конфигурацию теста. Это можно сделать после нажатия на кнопку Try another config. После нажатия на кнопку снова произойдёт создания виджета настройки конфигурации без необходимости перезапускать программу или переописывать методы. Далее необходимо ввести новые параметры тестирования и запустить тест. Результат появится на следующим виджете при завершении тестирования (рис…).

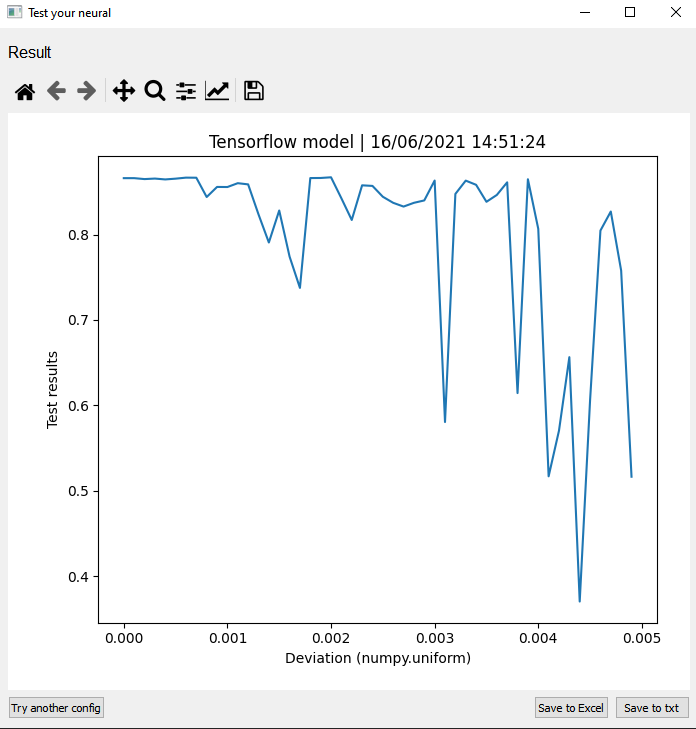


Рисунок … - Результат тестирования алгоритма uniform

Далее модель можно сохранить в виде изображения, используя кнопку с изображением дискеты над графиком (рис… и…) или в файлы excel и txt. Результаты сохранения отображены на рисунке ….

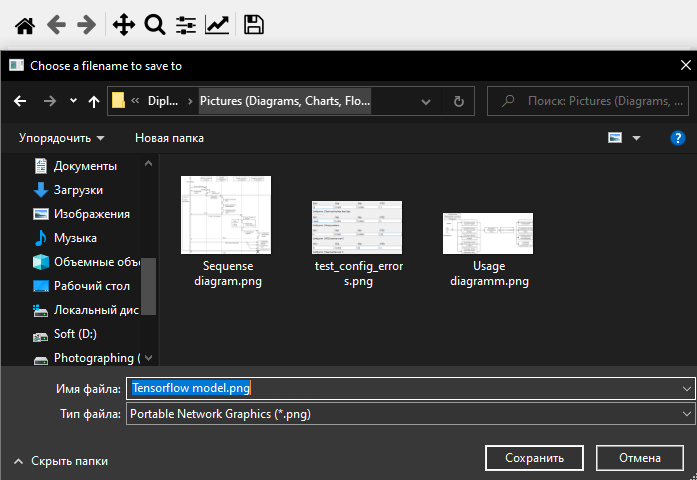


Рисунок … - Выбор места для сохранения графика в виде изображения

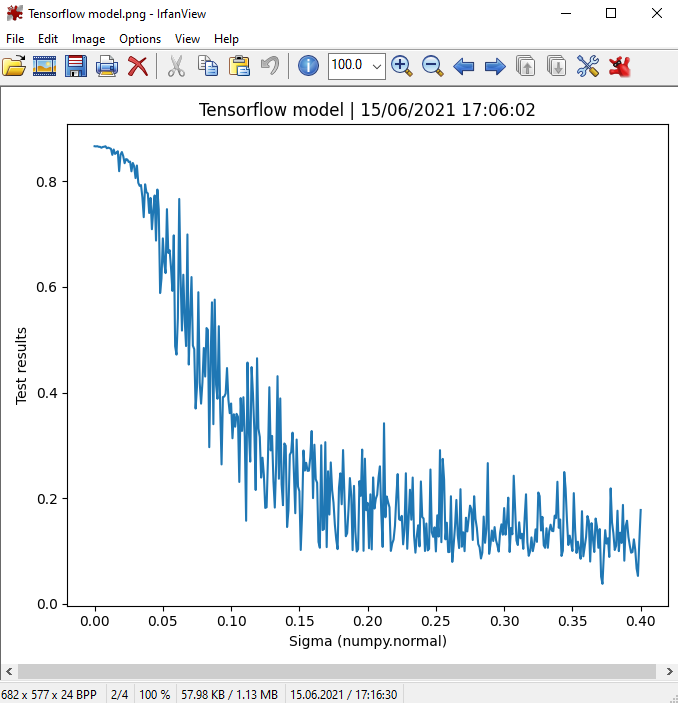
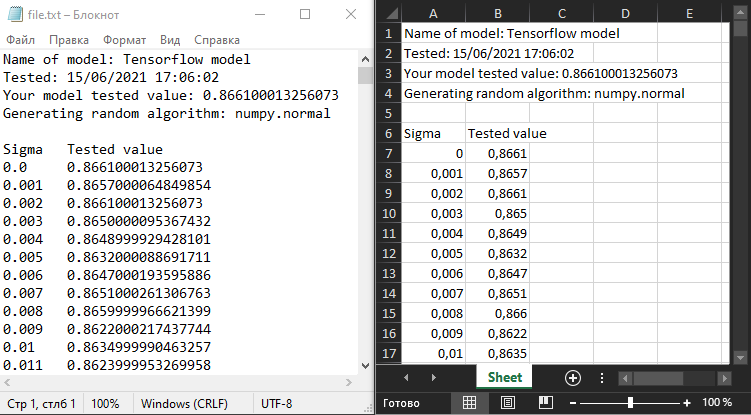


Рисунок … - Сохранённый график



а) б)

Рисунок… - Сохранение данных графиков: а – сохранение в txt;

б – сохранение в excel

# 4.2 Анализ производительности в зависимости от входных данных и аппаратных данных устройства

После проверки корректности работы данного модуля необходимо провести

тестирование на различных аппаратных конфигурациях системы, а также на нескольких моделях. Для тестирования было выбрано два компьютера, работающих под управлением операционной системы Windows 10.

Компьютер с объёмом оперативной памяти 16 Гб и частотой 3200 МГц и процессором AMD Ryzen 5 3600, имеющим тактовую частоту 3,6 ГГц и 6 физических (12 виртуальных) ядер (в дальнейшем Компьютер).

Ноутбук с объёмом оперативной памяти 8 Гб и частотой 2400 МГц и процессором Intel® Core(TM) i5-7200U, имеющим тактовую частоту 2,5 ГГц и 4 физических ядра (в дальнейшем Ноутбук).

Будет протестировано две модели нейронной сети:

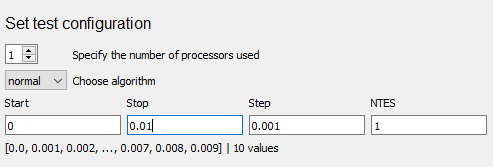
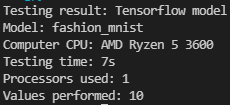
- модель Fashion\_MNIST с двумя слоями: 800 нейронов на входном слое и 10 нейронов - на выходном (в дальнейшем Fashion\_mnist);

- модель Fashion\_MNIST, имеющая 4 слоя: 800 нейронов на входном слое, 2 скрытых слоя, по 1000 нейронов в каждом, и выходной слой, состоящий из 10 нейронов (в дальнейшем Fashion\_mnist\_big).

Алгоритм будет всегда установлен normal (так как это не повлияет на процесс тестирования). Время выполнения каждого алгоритма различается несущественно и не сильно скажется на результатах тестирования.

4.2.1 Тестирование работы модуля на Компьютере

Первый тест будет задействовать всего одно ядро системы и иметь 10 входных данных для тестирования Fashion\_mnist (рис…).

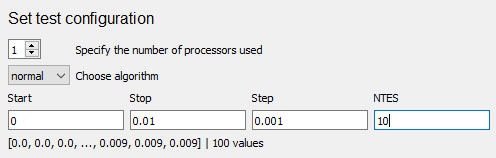
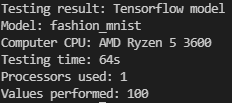
а) б)

Рисунок… - Конфигурация теста: а – конфигурация теста;

б – результат тестирования

Из результатов тестирования видно, что Компьютер на одном ядре обработал всю поставленную задачу за 7 секунд.

Второй тест будет задействовать также одно ядро, но количество входных данных вырастет до 100 для модели Fashion\_mnist (рис…).

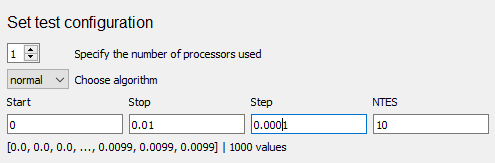
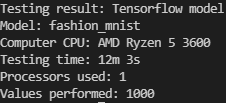
а) б)

Рисунок… - Конфигурация теста: а – конфигурация теста;

б – результат тестирования

В результате этого теста время тестирования выросло до 64 секунд.

Третьим тестом будет 1000 значений тестирования на одном ядре и на Fashion\_mnist. Для этого снова вызовем виджет настройки конфигурации и зададим новые параметры.

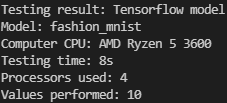
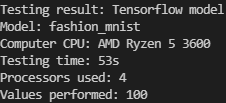
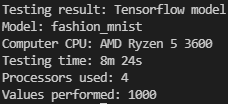
а) б)

Рисунок… - Конфигурация теста: а – конфигурация теста;

б – результат тестирования

В результате этого теста время выросло до 12-ти минут.

На рисунках ….а, ….б и ….в представлены аналогичные тесты для 4 используемых ядер (33% процессора системы). Это даст небольшой прирост в производительности и не сильно загрузит систему. Задачи будут разделены на 4 одинаковые части и посчитаны параллельно.

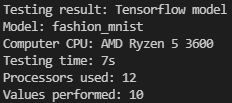
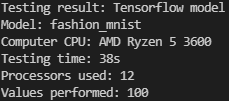
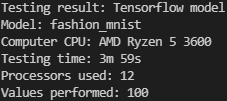
  

а) б) в)

Рисунок… - Тестирование Fashion\_mnist: а – 10 тестовых данных;

б – 100 тестовых данных; в – 1000 тестовых данных

Далее необходимо проверить работу программы на системе, нагрузив процессор на 100%, чтобы увеличить скорость обработки тестов. На рисунках ….а, ….б и ….в представлены аналогичные тесты для максимального количества используемых ядер в системе Компьютер.

а) б) в)

Рисунок… - Тестирование Fashion\_mnist: а – 10 тестовых данных;

б – 100 тестовых данных; в – 1000 тестовых данных

В результате проведённых тестов можно построить трёхмерный график зависимости времени тестирования от количества используемых при тестировании ядер и количества значений, которые нужно будет обработать (таб…).

Таблица … - Зависимость времени тестирования от ядер и количества операций

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ядра  Значения | 1 | 4 | 12 |
| 10 | 7 | 8 | 7 |
| 100 | 64 | 53 | 38 |
| 1000 | 723 | 504 | 239 |

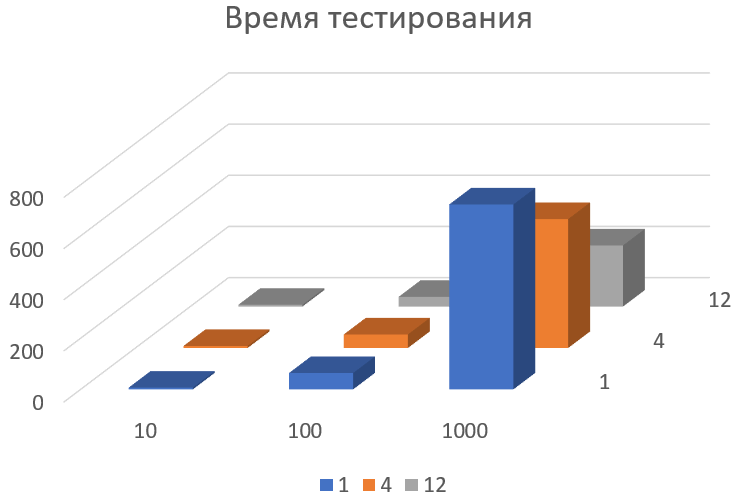


Рисунок … - График времени тестирования

Далее будут приведены аналогичные тесты для модели Fashion\_mnist\_big. Данные тестирования отображены в таблице ….

Таблица … - Зависимость времени тестирования от ядер и количества операций

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ядра  Значения | 1 | 4 | 12 |
| 10 | 16 | 13 | 12 |
| 100 | 102 | 87 | 56 |
| 1000 | 2152 | 1628 | 890 |

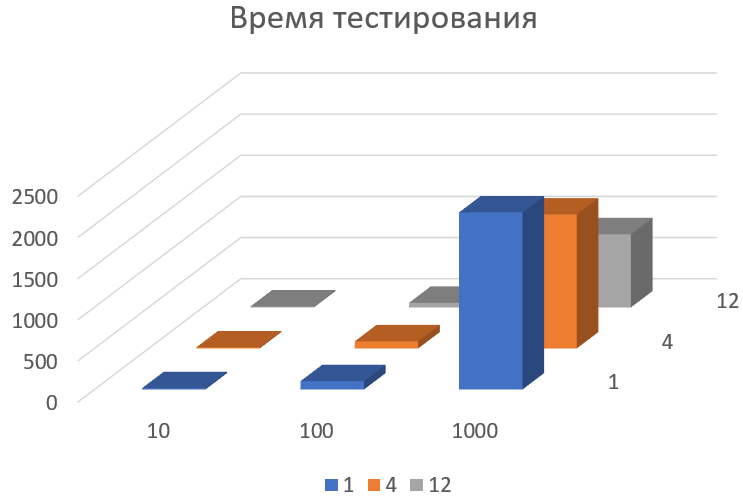


Рисунок … - График времени тестирования

Тестирование показало, что при использовании одноядерного решения поставленной задачи требуется в среднем на 150% больше времени, чем при разделении задачи на подзадачи и использовании системы на 100%.

Чтобы понять, насколько важно использовать многоядерную и мощную систему для тестирования нейронных сетей данным модулем, необходимо произвести аналогичные тесты на Ноутбуке – менее производительной системе.

4.2.2 Тестирование работы модуля на Ноутбуке

Тесты будут отличаться от прошлых только системой, на которой эти тесты будут выполняться и количеством используемых ядер (на Ноутбуке их 4). Вначале будет протестирована Fashion\_mnist. Результаты представлены в таблице … и на рисунке ….

Таблица … - Зависимость времени тестирования от ядер и количества операций

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ядра  Значения | 1 | 2 | 4 |
| 10 | 18 | 13 | 17 |
| 100 | 176 | 148 | 113 |
| 1000 | 2042 | 1593 | 1142 |

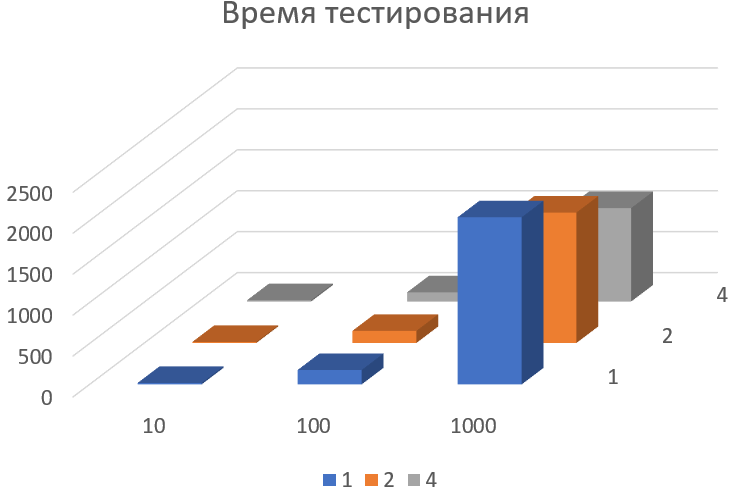


Рисунок … - График времени тестирования

Далее будет протестирована модели Fashion\_mnist\_big. Результаты представлены в таблице … и на рисунке ….

Таблица … - Зависимость времени тестирования от ядер и количества операций

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ядра  Значения | 1 | 2 | 4 |
| 10 | 31 | 25 | 24 |
| 100 | 299 | 231 | 170 |
| 1000 | 3102 | 2615 | 2097 |

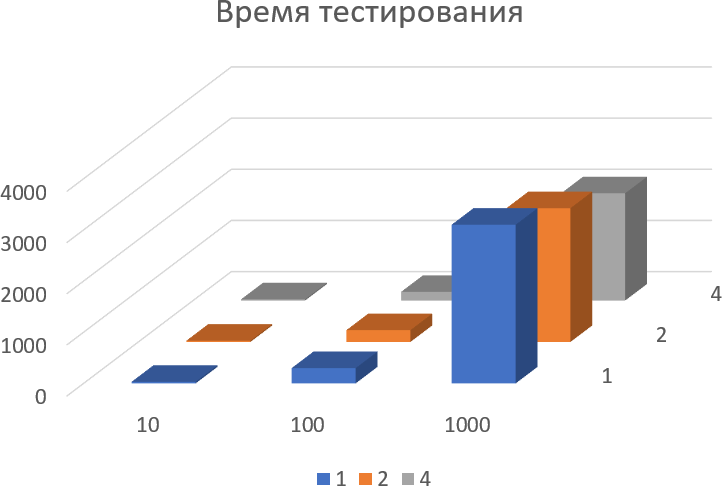


Рисунок … - График времени тестирования

4.2.3 Сравнение получившихся результатов

Все тесты проводились на системе, на которой не было запущено никаких других программных средств или утилит, кроме данной программы. Поэтому проведённые тесты можно назвать «чистыми» тестами.

Согласно проведённому тестированию, можно сделать вывод о том, что производительность системы сильно влияет на результаты. Чем больше ядер в системе, тем быстрее она может выполнить поставленную задачу, разбив её на множество подзадач.

От количества тестов зависит будущее время тестирования. Если таких тестов мало (в данном случае проверялось время выполнения 10-ти тестов), то время тестирования практически не изменяется, так как больше времени тратится на процесс разбития задачи на подзадачи. Но если увеличивать количество тестов, то происходит прирост производительности если увеличивать количество используемых ядер.

Также производительность данной программы напрямую зависит от системы, на которой производится тестирование. С увеличением аппаратных характеристик, таких как оперативная память (её объём и частота), процессор (его частота и количество физических ядер), также ускоряется процесс проведения тестов.

Таким образом, было проведено тестирование разработанной программы на двух системах: Компьютере и Ноутбуке. Программа корректно обрабатывает ошибки пользователя при описании дочернего класса программы, разбивает задачу на подзадачи, из-за чего сильно увеличивается производительность и уменьшается время тестирования.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приведено описание процесса разработки программы имитационного моделирования моделей машинного обучения.

Были выполнены следующие задачи, поставленные перед началом работы:

- произведен обзор предметной области;

- проанализированы методы ускорения процесса обработки нейросетей;

- …

- проанализировано изменение данных внутри нейросетей при различных отклонениях входных параметров, в результате были сделаны следующие выводы:

(тут выводы, которые можно сделать, исходя из тестирования)

Таким образом, задачи, поставленные на выпускную квалификационную работу, можно считать выполненными в полном объеме.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Jesse, R. Искусственная нейронная сеть/Jesse Russell. - М.: VSD, 2012. - 630c.

2 Акопов, А.С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Акопов — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 389 с.

3 Боев, В.Д. Имитационное моделирование систем : учеб. пособие для прикладного бакалавриата // М. : Издательство Юрайт, 2017. 253 с.

4 Вьюненко, Л.Ф. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата / Л. Ф. Вьюненко, М. В. Михайлов,; под ред. Л. Ф. Вьюненко. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 283 с.

-5 Галушкин, А. И. Нейрокомпьютеры. Учебное пособие / А.И. Галушкин. - М.: Альянс, 2014. - 528 c.

6 Гелиг, А. Х. Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей. Учебное пособие / А.Х. Гелиг, А.С. Матвеев. - М.: Издательство СПбГУ, 2014. - 224 c.

-7 Каган, Б. М., Каневский, М. М., Цифровые вычислительные машины и системы, 2-е изд., М., 1973. – 347 с.

8 Калачев А.В. Многоядерные процессоры; Интернет-университет информационных технологий, Бином. Лаборатория знаний - М., 2015. - 248 c.

9 Калачев, А.В. Многоядерные процессоры. Учебное пособие; Интернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ) - М., 2017. - 132 c.

10 Кобелев, Н.Б. Имитационное моделирование объектов с хаотическими факторами: Учебное пособие / Кобелев Н.Б. - М.: КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 192 с.

11 Кораблев, Ю.А. Имитационное моделирование: учебник / Ю.А. Кораблев. — Москва: КНОРУС, 2017. — 146 с.

12 Перепелкин, Е.Е. Вычисления на графических процессорах (GPU) в задачах математической и теоретической физики; Огни - Москва, 2017. - 750 c.

13 Редько, В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики / В.Г. Редько. - Москва: СИНТЕГ, 2017. - 224 c.

14 Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. - М.: Горячая линия - Телеком, 2013. - 384 c.

-15 Смирнов А. Д. Архитектура вычислительных систем: Учебное пособие для вузов. — М.: Наука, 1990. — 320 с

16 Справочник по цифровой вычислительной технике, под ред. Б. Н. Малиновского, К., 1974. – 638 с.

17 Таненбаум, Э.С. Современные операционные системы: [пер. с англ.]. Питер, 2011. – 1115 с.

18 Тархов, Д.А. Нейросетевые модели и алгоритмы. Справочник / Д.А. Тархов. - М.: Радиотехника, 2014. - 397 c.

19 Фет, Я.И. Массовая обработка информации в специализированных однородных процессорах; Новосибирск: СО АН СССР - М., 2016. - 199 c.

20 Флорес, А., Организация вычислительных машин, пер. с англ., М., 1972. – 634 с.

21 Янюшкин, В.В. Программные компоненты и архитектурные решения распределенных информационных систем на основе применения технологии cloud computing и WCF. / мат.межвуз.научн.техн.конф. – Новочеркасск: НВВКУС, 2009.- с.239-241.