

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
профессионального образования**

КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ВЫСШАЯ ШКОЛА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Направление подготовки: 09.03.03 — Прикладная информатика

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

**Симуляция моторного вывода мозга в контексте архитектуры
NEUCOGAR**

Работа завершена:

«_____» _____ г.

Студент группы 11-307

_____ Р. С. Гайфуллин

Работа допущена к защите:

Научный руководитель

к. т. н., доцент

«_____» _____ г.

_____ М. О. Таланов

Директор Высшей школы ИТИС

«_____» _____ г.

_____ А. Ф. Хасьянов

Казань — 2017 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список иллюстраций	4
Список таблиц	5
Введение	6
1. NEUCOGAR, организация моторного вывода	9
1.1. NEUCOGAR	9
1.2. Организация моторного вывода	9
1.2.1. Моторная кора	9
1.2.2. Ствол головного мозга	10
1.2.3. Основные проводящие пути	11
2. Теоретическое обоснование	14
2.1. NEST	14
2.2. NEUCOGAR, интеграция	14
2.3. Валидация	14
2.3.1. Проверка влияния афферентных путей	15
2.3.2. Проверка взаимосвязи между моторным выводом и оцен- кой	15
3. Спецификация	16
3.1. Общая характеристика симуляции	16
3.2. Основные функции	16
3.3. Пути моделирования	17
3.3.1. Кортикоспинальный тракт	17
3.3.2. Афферентный кортикальный вход	17
3.4. Используемые типы синапсов	18
4. Реализация	19
4.1. Интеграция	19
4.2. Тесты	21
5. Результаты	22
5.1. Производительность	22
5.2. Результаты эксперимента	22

5.3. Стимуляция моторной коры с эмоциональной мотивацией . . .	22
5.4. Влияние афферентных путей на систему	24
Заключение	28
5.5. Рекомендации к дальнейшему исследованию	28
5.6. Перспективы применения	28
5.7. Вывод	29
Список литературы	30
А. Теория	31
Б. Листинги исходного кода	32

СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ

1.	Двигательный гомункулус.	10
2.	Структурная связность моторной системы.	13
3.	Количество синапсов.	23
4.	Время исполнения.	23
5.	Потребление памяти.	24
6.	Нейрональная активность в моторной коре в течении симуляции.	25
7.	Нейронная активность в чувствительных клетках тела.	26
8.	Нейронная активность в спинном мозгу.	27

СПИСОК ТАБЛИЦ

1.	Условия запуска	16
2.	Параметры соединения нейронов	17
3.	Параметры групп	17

ВВЕДЕНИЕ

В информационных технологиях с течением времени все больше развития получают методы работы с данными, при которой исчерпывающие исходные данные о среде задать невозможно, или нецелесообразно, в связи с противоречивостью или слабой формализацией среды. Особенностью такого рода подхода является возможность применения в задачах, не предназначенных изначально для обработки компьютером, в которых традиционные алгоритмы, как правило, сильно ограничены.

Один из подходов к работе с нечеткой логикой — искусственные нейронные сети (ИНС), представляет собой математическую модель, построенную по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей, состоящих из нервных клеток.

Понятие ИНС появилось в результате разработки Мак-Каллоком и Питтсом в 1943 году компьютерной модели нейронной сети на основе математических алгоритмов и теории деятельности головного мозга. Впоследствии, после разработки алгоритмов обучения (в частности, метода обратного распространения ошибки), получаемые модели стали использовать в практических целях: в задачах прогнозирования, для распознавания образов и др. ИНС представляют собой систему соединённых и взаимодействующих между собой относительно простых (искусственных) нейронов.

Возможность обучения — главное преимущество нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Нейронные сети способны в процессе обучения выявлять сложные нелинейные зависимости между входными данными и выходными, а также на основе полученных данных обобщать зависимости на всю область.

Научно-технический прогресс в информационных технологиях и развитие быстродействия вычислительных машин во многом ответственны за повторный всплеск интереса к нейронным сетям. Здесь находят применение данные о функционировании различных подсистем головного мозга (в первую очередь зрительная и слуховая). При текущем уровне производительности компью-

теров на них возможна работа искусственных нейронных сетей, выполняющих ранее недоступные для компьютера задачи (вождение автомобиля, победа в 2017 году машины над человеком в игре Go). Это открывает новые возможности взаимодействия с информацией и качественно новый уровень возможностей ее использования.

ИНС нашли применение в системах: поисковых, машинного перевода, распознавания лиц, эмоций, объектов, и т.д.

Проекты Blue Brain Project и Human Brain Project нацелены на создание инфраструктуры для моделирования всего мозга целиком в изолированной компьютерной среде, создание цифровых реконструкций мозга грызуна и, в конечном счете, человека. Некоторые коллективы исследователей заняты исследованием технической реализуемости симуляции. Так, в Японии, на суперкомпьютере K, (занимает 7-ю позицию в рейтинге Top-500 по состоянию на ноябрь 2016) в 2017 году была предпринята тестовая попытка воссоздания нейронной сети, приближенной к биологическому мозгу человека. (Largest neuronal network simulation achieved using K computer.) В результате удалось запустить на фреймворке NEST [1] цифровой аналог 1% объема мозга, на основании чего группа ученых из RIKEN HPCI делают предположение, что с появлением эксафлопсного суперкомпьютера станет возможной симуляция всего мозга человека.

Данная работа выполнена в рамках проекта искусственной когнитивной архитектуры для интеллектуальных систем — нейромодулирующей когнитивной архитектуры (NEUCOGAR [2]). Модель биомиметически вдохновлена и адаптирует роль нейромодуляторов человеческого мозга в вычислительные среды. Основной идеей работы является моделирование ответственных за моторный вывод в контексте эмоциональной оценки областей мозга. Задачами работы являются:

- выделение важных для моторной активности участков мозга
- построение нейронной сети, повторяющей биологическое устройство моторного вывода мозга
- интеграция когнитивной архитектуры NEUCOGAR с полученной моделью

Моделирование проводилось во фреймворке NEST, в качестве языка программирования применяется Python.

ГЛАВА 1. NEUCOGAR, ОРГАНИЗАЦИЯ МОТОРНОГО ВЫВОДА

1.1. NEUCOGAR

Базисом когнитивных архитектур является предположение, что функциональные аспекты мышления человека можно описать на уровне вычислений и воспроизвести в машине на принципах, не требующих детального моделирования нейронов и структур мозга. В первую очередь:

- принципы восприятия информации
- осмысление информации
- принятие и исполнение решений

Ключевыми при таком подходе являются принципы социального и эмоционального интеллекта. Создание и осознание в машине аналога человеческого субъекта на этих принципах может привести к технологическому прорыву и созданию , который окажет огромное влияние на жизнь человека.

Целью NEUCOGAR является моделирование влияния серотонина, дофамина и норадреналина на симуляции мозга, основанные на архитектуре фон Неймана. И реализовать данные явления в виде на модели, исполнимой в машине Тьюринга. В качестве основы моделирования используется расширенный Куб эмоций Лёвхейма. Валидация проводится путем моделирования на вычислительной системе нейромодуляции дофамина и ее влияния на кору.

1.2. Организация моторного вывода

1.2.1. Моторная кора

Моторная кора является областью коры головного мозга, которая участвует в планировании, контроле и выполнении добровольных движений. Она представляет собой область лобной доли, расположенную в задней прецентральной извилине, непосредственно перед центральной борозды. [3] Компоненты моторной коры:

- первичная моторная зона — основной источник нейронных импульсов, которые проходят вниз по спинному мозгу и контролируют выполнение движения

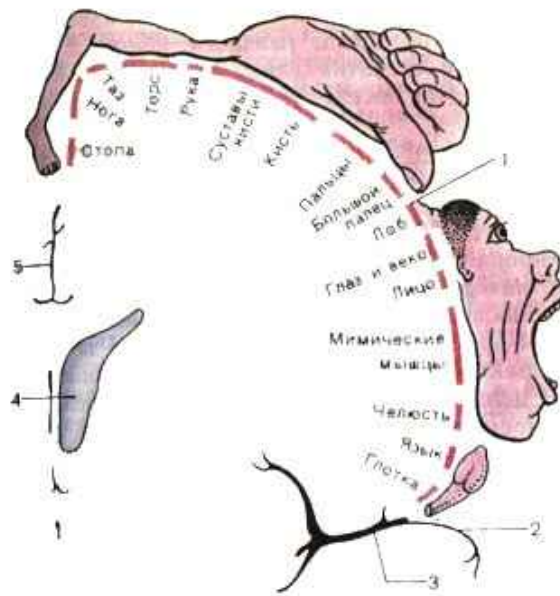


Рисунок 1. Двигательный гомункулус.

- премоторная зона отвечает за некоторые аспекты управления движением, включая подготовку к ней, оркестровку и пространственное наведение на достижение цели
- дополнительная моторная область — внутреннее планирование движения, последовательности и координацию исполнения движений

Задняя теменная кора иногда также считается частью группы кортикальных областей. Она несет ответственность за интеграцию сенсорной информации в моторные команды и за некоторые аспекты моторного планирования. [4]

Двигательная кора в целом — это мозаика двигательных групп нейронов, относящихся к определенным группам мышц. Данные группы организованы соматотопически и в совокупности составляют схематичное отображение тела человека на коре мозга, называемый гомункулус 1.

1.2.2. Ствол головного мозга

Ствол мозга при помощи серого вещества обеспечивает многие основные функции для выживания организма, кроме того, исполняет рефлексy. Он состоит из нескольких структурных элементов:

- средний мозг
- Варолиев мост

- продолговатый мозг

Белое вещества мозгового ствола образует связи между мозгом и телом через спинной мозг, в том числе:

- кортикоспинальный тракт для передачи сигналов мышцам для исполнения движений
- спиноталамический тракт для сигнализации боли, зуда и других стимулов

Ретикулярная формация, которая распространяется по всему стволу мозга, выполняет несколько важных функций, включая стимуляцию коры головного мозга и поддержку мышечного тонуса. Стимуляция коры головного мозга ретикулярной формацией вызывает эффект бодрствования и сознания, тогда как инактивация ретикулярной формации приводит к сну.

Через продолговатый мозг проходят все нейроны, соединяющие мозг со спинным мозгом, и на уровне продолговатого мозга около 90% этих нейронов перемещаются с левой стороны тела вправо и наоборот. [5] Хотя причина этого явления неизвестна, оно объясняет, почему мозг чувствует и контролирует контралатеральную сторону тела. Эти нейроны, проходящие через продолговатый мозг, также множество раз передают свой сигнал другому нейрону, который несет сигнал дальше к мозгу или телу. Ядра серого вещества в продолговатом мозге включают сердечно-сосудистый центр, который контролирует сердечный ритм и кровяное давление, а также область, которая контролирует скорость дыхания. Многие жизненные рефлексy интегрированы в продолговатый мозг, в том числе рефлексy глотания, рвоты и кашля.

Подобно продолговатому мозгу, Варолиев мост(в дальнейшем мост) играет важную роль в коммуникациях, так как содержит нейроны, которые соединяют более высокие области мозга с продолговатым мозгом и спинным мозгом.

1.2.3. Основные проводящие пути

Добровольные движения верхней конечности происходят в основном из контралатеральной моторной коры, которая получает входные сигналы от лобной и теменной областей, которые играют важную роль в сенсомоторной обработке. Моторные области коры мозга плотно взаимосвязаны в пределах одного

полушария через связные пути и соединяются с гомологичными областями противоположного полушария.

Кортикоспинальный тракт является основным двигательным путем. Он образован большими пирамидальными нейронами из первичной моторной зоны. Тракт проходит через весь головной мозг и в нижней части продолговатого мозга примерно 90% его волокон переходит на противоположную сторону, формируя боковой пирамидный тракт. Остальные волокна спускаются в спинной мозг, не пересекаясь. Считается, что эти непересеченные передние выступы главным образом иннервируют проксимальные мышцы, а не дистальные мышцы предплечья и руки. [6]

Афферентный кортикальный вход, необходимый для точного выполнения движений, доставляет сенсорную информацию через таламокортикальное пути в двигательные области и первичную и вторичную сенсорные области. Обзор соответствующих трактов и структур, связанных с сенсомоторной функцией конечностей, представлен на рис. 2.

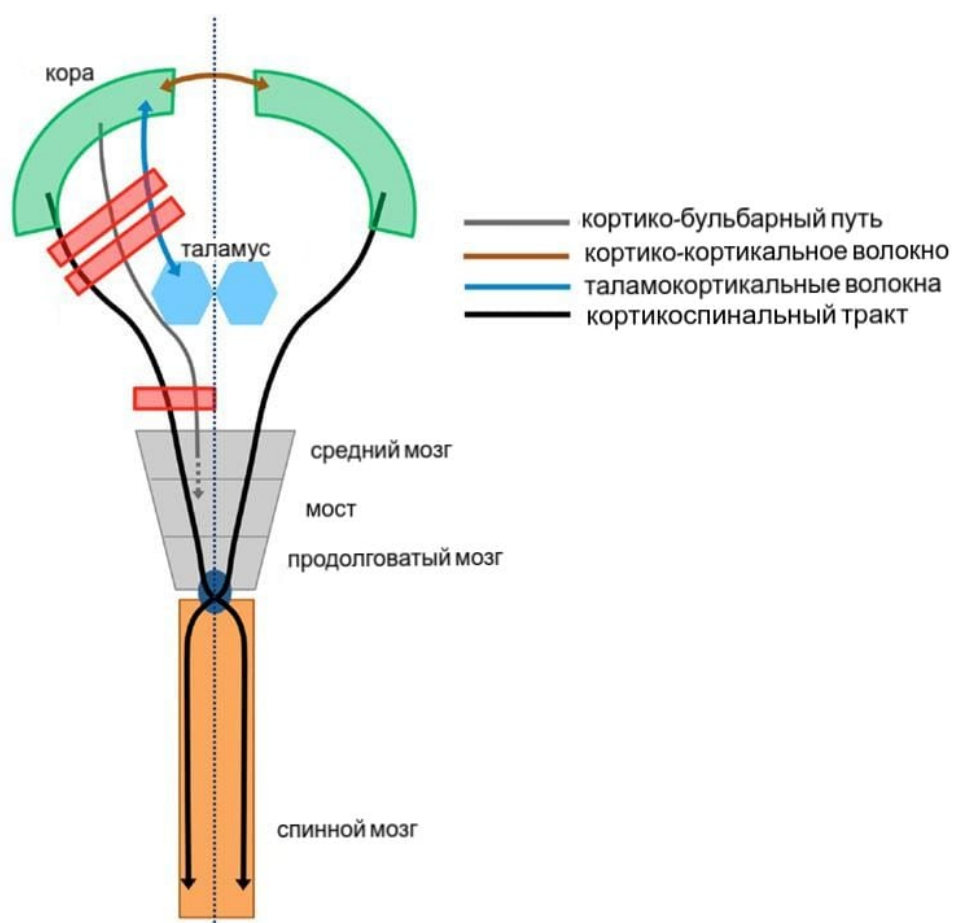


Рисунок 2. Структурная связность моторной системы.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

2.1. NEST

NEST является симулятором нейросетевых моделей, он фокусируется в большей степени на динамике и структуре нейронных систем, чем на точной морфологии отдельных нейронов. Основное преимущество данного фреймворка в том, что в NEST реализованы практически все необходимые для проведения эксперимента типы нейронов, синапсов, нейромодуляторов и нейромедиаторов.

Кроме того, NEST имеет удобный API для языка Python, он называется PyNEST, и предоставляет набор команд интерпретатору Python, которые дают доступ к описанию эксперимента, и контролю над его проведением. Сама симуляция при этом запускается в оптимизированном ядре моделирования NEST. Моделирование NEST пытается следовать логике эксперимента в действительности, который просчитывается компьютером. Однако при этом исследуемая нейронная система определяется экспериментатором.

Он подходит для моделирования:

- обработки информации, например в коре мозга
- моделей динамики активности в нейронной произвольной сети
- обучения и пластичности

2.2. NEUCOGAR, интеграция

В коде когнитивной архитектуры NEUCOGAR реализованы пути распространения основных нейромодуляторов, благодаря этому при интеграции данной модели моторной активности с кодовой базой NEUCOGAR можно исследовать взаимодействие моторной и лимбической систем мозга. Для обоснования работоспособности данной модели нужно исследовать реакцию системы на различные ситуации.

2.3. Валидация

Будет проведено несколько экспериментов для мониторинга реакции агента на различные ситуации.

2.3.1. Проверка влияния афферентных путей

- ввод системы в состояние «удивления»
- внезапный и высокочастотный стимул со стороны афферентного пути, сигнализирующего о внезапном интенсивном взаимодействии со средой

Ожидается активизация таламуса, с последующим воздействием на остальную систему эмоциональной оценки.

2.3.2. Проверка взаимосвязи между моторным выводом и оценкой

- ввод системы в состояние «удивления»
- посмотреть на активацию потенциалов действия в спинном мозге и нервомышечных соединениях
- задать более жесткий стимул для активации мышц в виде подключения генераторов к моторной коре мозга
- рассмотреть результаты

С применением прямого стимула совмещенного с эмоциональной оценкой «удивления» результирующая частота активации потенциалов действия в нейронах усилится, превзойдет результаты стимуляции по отдельности и эмоциональной оценки, и прямого воздействия на двигательную кору.

ГЛАВА 3. СПЕЦИФИКАЦИЯ

3.1. Общая характеристика симуляции

Запускается программа локально, для параллельных вычислений используется openMP. Симуляция проводится при следующих характеристиках компьютера и симуляции: 1

3.2. Основные функции

Самой частой для данного сценария использования командой является:

```
Connect(pre, post, conn_spec=None, syn_spec=None, model=None)
```

Значения параметров описаны в таблице 2. Команда соединяет две группы нейронов согласно заданным правилам.

Стоит отметить также функцию соединения детектора с нейронами сети для замера полученных результатов симуляции.

```
def connect_detector(part):
    name = parts_dict[part]
    number = len(part) if len(part) < N_rec else N_rec
    spikedetectors[name] = nest.Create('spike_detector', params=
    detector_param)
    nest.Connect(part[:number], spikedetectors[name])
```

Функция соединяет к заданному в словаре part набору нейронов детектор, который считывает показания с number нейронов.

Список ключей в словаре part и значения каждого ключа заданы в таблице 3

Таблица 1. Условия запуска

Параметр	Значение
Начало	0 мс.
Конец	1000 мс.
Дискретизация по времени	10 мс.
Объем оперативной памяти	5 Гбайт
Процессор	AMD A10-4655M
Количество ядер	4

Таблица 2. Параметры соединения нейронов

Параметр	Значение
pre	Пресинаптические нейроны
post	Постсинаптические нейроны
conn_спес	Словарь, определяющий правила подключения
syn_спес	Словарь, описывающий синапс
model	Тип синапса

Таблица 3. Параметры групп

Параметр	Значение
k_name	Название
k_NN	Число нейронов

3.3. Пути моделирования

Основные отделы мозга, имеющие влияние на двигательную активность были ранее описаны в 1.2. В данном случае необходимо интегрировать группу нейронов, относящихся к: спинному мозгу, стволу головного мозга, моторной коре, нейромускулярным соединениям и чувствительным клеткам периферической нервной системы с основной кодовой базой проекта.

3.3.1. Кортикоспинальный тракт

В коде NEUCOGAR имеется реализации моторной коры. именно отсюда берет начало данный путь, известно, что он отвечает за исполнение добровольных движений, тип соединений — возбуждающий Glu синапс.

3.3.2. Афферентный кортикальный вход

Данный путь ответственен за отдачу сенсорной информации в кору головного мозга через таламокортикальное пути в двигательные и сенсорные области, так как таламокортикальное пути в проекте реализованы, необходимо задать соединения данного пути с необходимым участком таламуса.

3.4. Используемые типы синапсов

В проекте используется несколько типов синапсов, однако, так как все, что касается дофамина, серотонина и норадреналина уже реализовано, для реализации данного проекта необходимо лишь два:

- GABA, нейротрансмиттер — гамма-аминомасляная кислота (ГАМК), тормозной
- Glu, возбуждающий нейротрансмиттер — глутаминовая кислота

ГЛАВА 4. РЕАЛИЗАЦИЯ

4.1. Интеграция

Полученная модель состоит из следующих составных частей:

- спинной мозг
- продолговатый мозг
- Варолиев мост
- нейромышечные соединения
- чувствительные нейроны периферической нервной системы, восходящие по спинному мозгу, через таламокортикальные пути к моторной и сенсорной областям коры мозга

В листинге ниже представлен код, представляющий эти данные в удобном для проекта NEUCOGAR виде:

```
spine = ({k_name: 'Spinal cord [Glu1]'},      # to lower motor neurons
         {k_name: 'Spinal cord [Glu2]'},      # upwards to the thalamus
         {k_name: 'Spinal cord [GABA]'},)     # pain reduction, internal use only
spine_Glu1, spine_Glu2, spine_GABA = range(3)

nmj = ({k_name: 'Muscle [Glu]'},)
nmj_Glu = 0

cellBodies = ({k_name: 'Muscle [Glu]'},)
cellBodies_Glu = 0

medulla = ({k_name: 'Medulla [GABA]'}, )
medulla_GABA = 0

reticular_formation = ({k_name: 'Reticular formation [Glu]'},
                        {k_name: 'Reticular formation [5HT]'},)
reticular_formation_Glu, reticular_formation_5HT = range(2)

pons = ({k_name: 'Pons [Glu]'},
        {k_name: 'Pons [5HT]'})
pons_Glu, pons_5HT = range(2)

pons[pons_5HT][k_NN] = 1000
pons[pons_Glu][k_NN] = 1500
medulla[medulla_GABA][k_NN] = 4000
```

```

spine_NN = 15000
spine[spine_Glu1][k_NN] = spine_NN / 2
spine[spine_Glu2][k_NN] = spine_NN / 3
spine[spine_GABA][k_NN] = spine_NN / 6

nmj[nmj_Glu][k_NN] = spine_NN
cellBodies[cellBodies_Glu][k_NN] = spine[spine_Glu1][k_NN]
reticular_formation[reticular_formation_Glu][k_NN] = 1000
reticular_formation[reticular_formation_5HT][k_NN] = 1000

```

Все нужные пути и отделы мозга представлены в виде словарей, где парами ключ-значение являются количество нейронов в отделе и название, `k_NN` и `k_name` соответственно. Представленные данные о количестве нейронов приведены в соответствие с общей тенденцией проекта к численности нейронов.

Остается соединить данные системы с готовой кодовой базой проекта, однако, стоит обратить внимание на Варолиев мост, он уже представлен в коде, поэтому он был расширен. В частности, к уже существующим серотониновым рецепторам добавлена необходимая для нисходящего пути часть.

В следующем листинге представлен код, создающий нужные для работы афферентных и эфферентных путей нейронные связи между частями мозга:

```

# * * * ЭФФЕРЕНТНЫЕ * * *
# * * * КОРТИКОСПИНАЛЬНЫЙ ТРАКТ * * *
# connect(motor[motor_Glu1], medulla[medulla_GABA], syn_type=GABA, weight_coef
    =0.01)
connect(motor[motor_Glu1], spine[spine_Glu1], syn_type=Glu)
connect(spine[spine_Glu1], nmj[nmj_Glu], syn_type=Glu)

# # * * * КОРТИКОБУЛЬВАРНЫЙ ТРАКТ * * *
connect(motor[motor_Glu0], medulla[medulla_GABA], syn_type=Glu)
# # * * * РЕТИКУЛОСПИНАЛЬНЫЙ ТРАКТ * * *
connect(pons[pons_Glu], spine[spine_GABA], syn_type=Glu)
connect(medulla[medulla_GABA], spine[spine_GABA], syn_type=GABA)

# * * * АФФЕРЕНТНЫЕ * * *
# * * * СПИНОТАЛАМИЧЕСКИЙ ПУТЬ * * *
connect(cellBodies[cellBodies_Glu], spine[spine_Glu2], syn_type=Glu)
connect(spine[spine_Glu2], thalamus[thalamus_Glu], syn_type=Glu)

```

По представленному коду видны проекции нейронных путей из моторной коры к спинному мозгу, и, в конечном итоге, к мышцам. Также восходящий путь от клеток тела к таламусу, для интеграции сигнала, и дальнейшей отправки к коре головного мозга, в основном, к его сенсорной части, которая реализована, к сожалению, в ограниченном виде.

4.2. Тесты

Было проведено несколько серий тестов:

- серия из нескольких запусков с различным общим количеством нейронов для проверки быстродействия и потребления памяти
- серия экспериментов для проверки полученной модели, описанные в 2.3

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

5.1. Производительность

Ввиду большой связности компонентов нейронной сети между собой линейный рост количества нейронов выливается в квадратичный рост сложности вычислений, так как число соединений между нейронами при достаточно малом количестве нейронов растет в квадрате от их числа (до того момента, как число нейронов превысит 4000 штук) Для измерения потребления ресурсов компьютера в ходе экспериментов полученный программный код был запущен несколько раз, с различным количеством нейронов в общей сложности.

Как видно на рисунке 3, отчетливо прослеживается нелинейная взаимосвязь между количеством нейронов и синапсов. График выглядит как квадратичная функция.

На рисунке 4, изображена зависимость скорости исполнения от количества нейронов, данный график так же представляет собой квадратичную функцию, что интуитивно понятно, учитывая что график роста количества синапсов имеет прямое влияние на скорость вычислений, что в свою очередь выдает результат, растущий подобным скорости роста количества вычислений образом.

Однако, потребление памяти на рисунке 5 имеет слегка отличный график роста. Данное явление объяснимо необходимостью дополнительных аллокаций для ядра симуляции NEST и сборкой мусора в Python. Несмотря на это, график имеет нелинейный порядок роста.

5.2. Результаты эксперимента

5.3. Стимуляция моторной коры с эмоциональной мотивацией

На изображении 6 представлена активность моторной коры во время симуляции. Симулируется эмоциональная оценка в течении отрезка времени с 100 мс. до 450 мс., после чего включается генерация потенциалов действия на моторной коре (400, 550), полученная в результате моторная активность, подкрепленная эмоциональным стимулом получается гораздо значительней, нежели симуляция какого-нибудь компонента в отдельности. В отрезок времени с

Количество синапсов

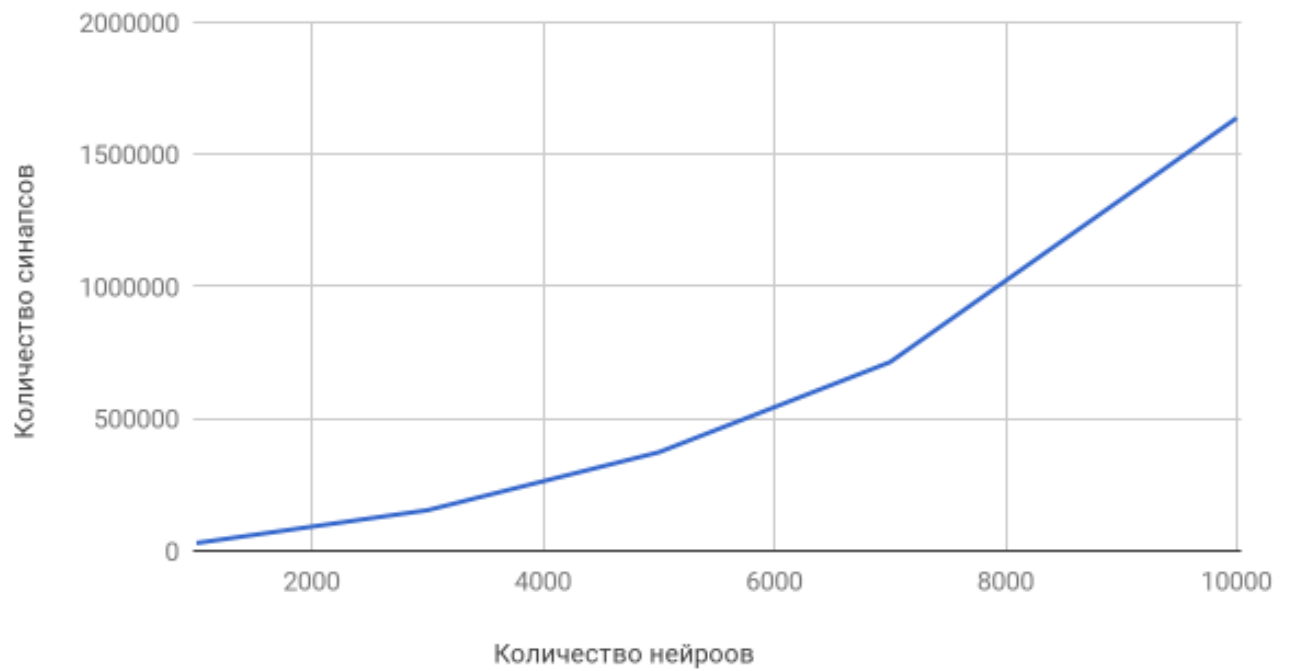


Рисунок 3. Количество синапсов.

Производительность

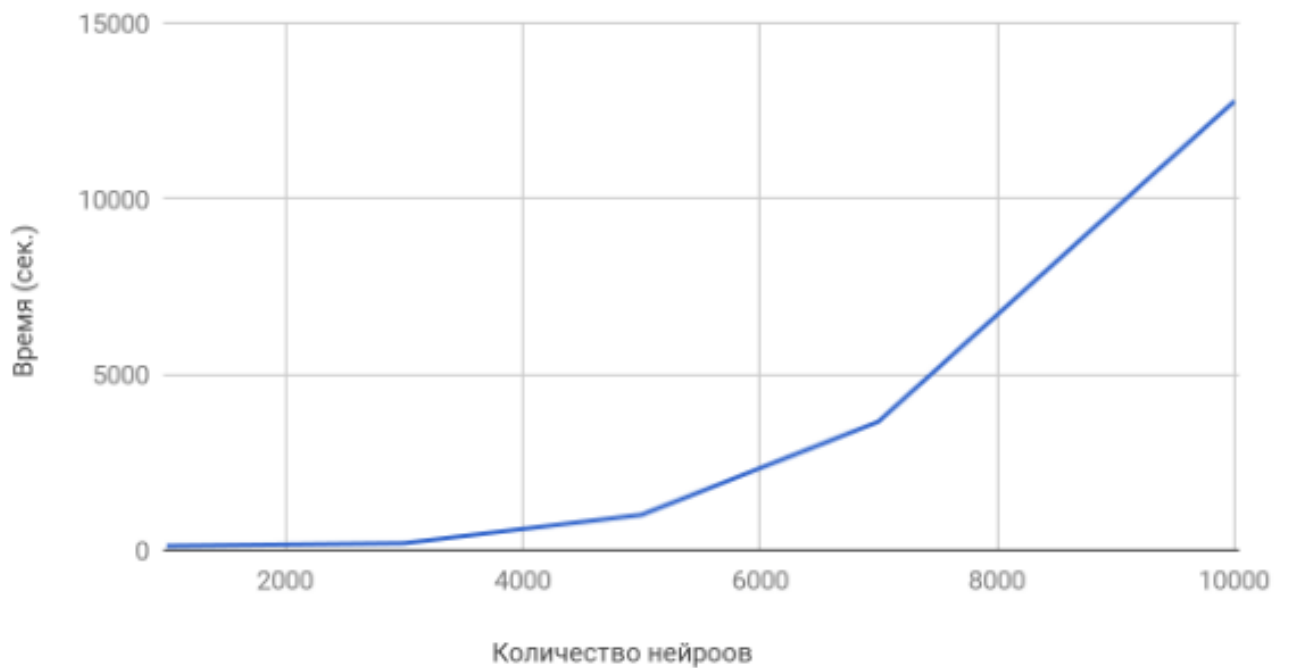


Рисунок 4. Время исполнения.

Потребление памяти

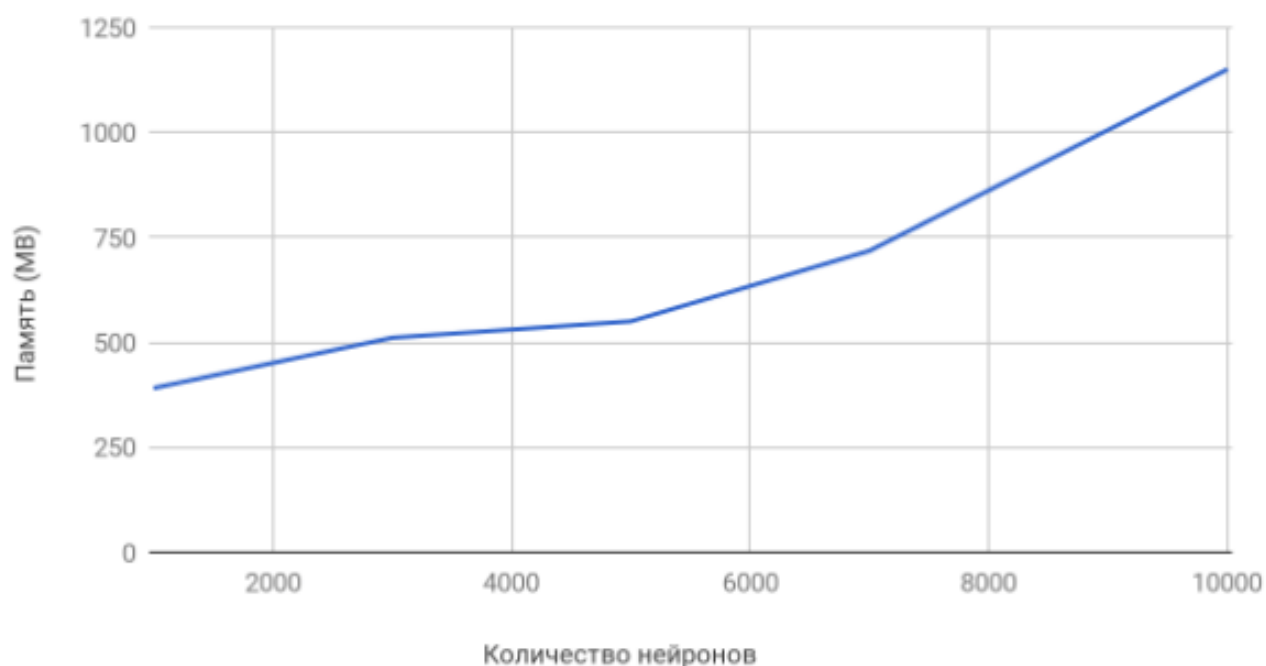


Рисунок 5. Потребление памяти.

700-800 мс. работает лишь стимулирование спайковой активности в моторной коре.

5.4. Влияние афферентных путей на систему

Эксперимент составлен согласно плану 2.3.1. Запускается моделирование эмоции «удивление», после чего, ближе к ее концу запускается сигнал вверх по восходящему спиноталамическому пути информация о неожиданном интенсивном взаимодействии со средой, в результате данного эксперимента активность на спинном мозге резко возрастает, что в свою очередь вызывает дополнительную активность в мышцах. Влияние данного стимулирования хорошо прослеживается сквозь весь нисходящий кортикоспинальный тракт.

На рис. 7 изображена активность нейронов на самом нижнем уровне восходящего спиноталамического тракта. Это имеет следующие последствия для нисходящего тракта на уровне спинного мозга: рис 8. На изображении виден резкий подъем активности спинного мозга, а затем, его медленный спад, в связи с отключением стимуляции эмоциональной системы. И, его полное угасание из-за отключения генератора спайков на восходящем тракте.

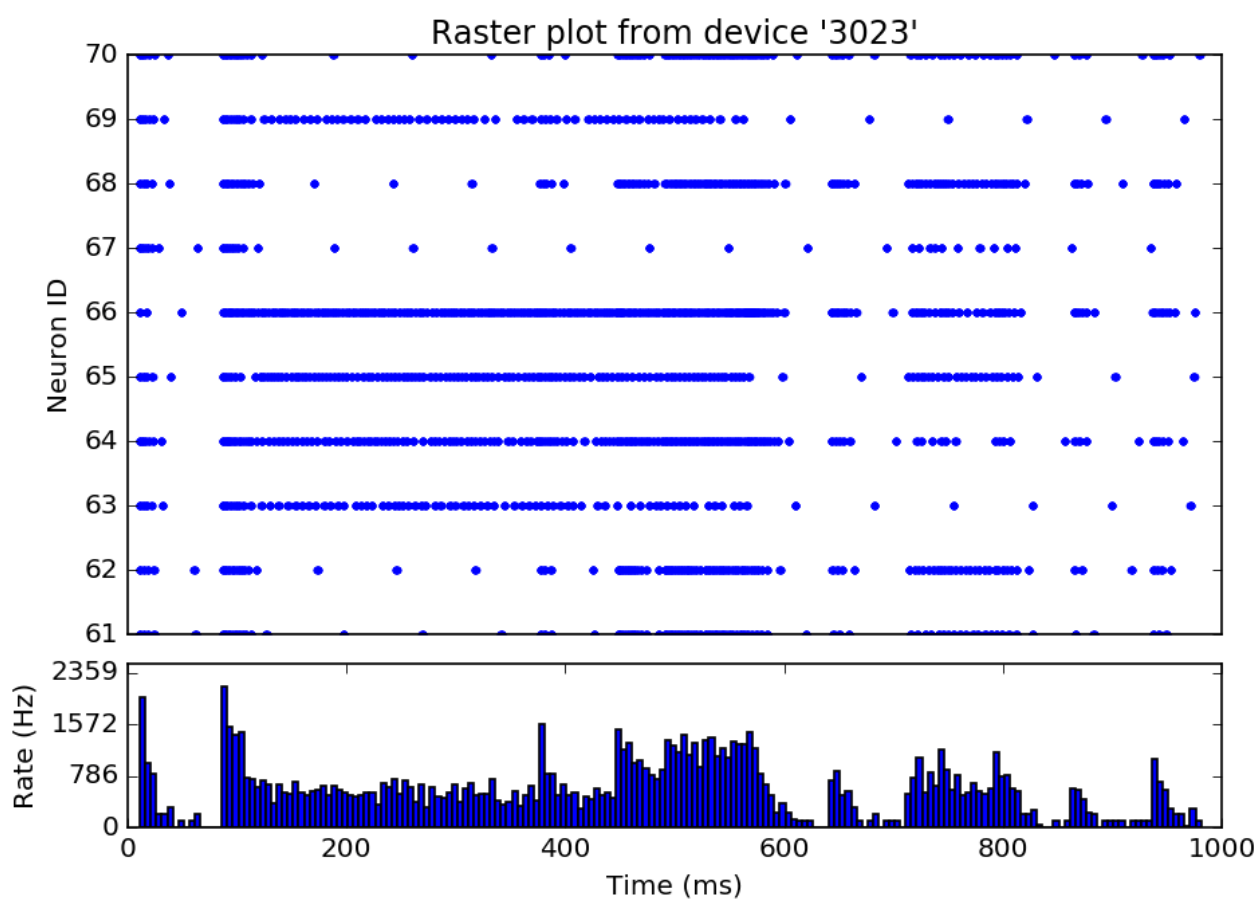


Рисунок 6. Нейрональная активность в моторной коре в течении симуляции.

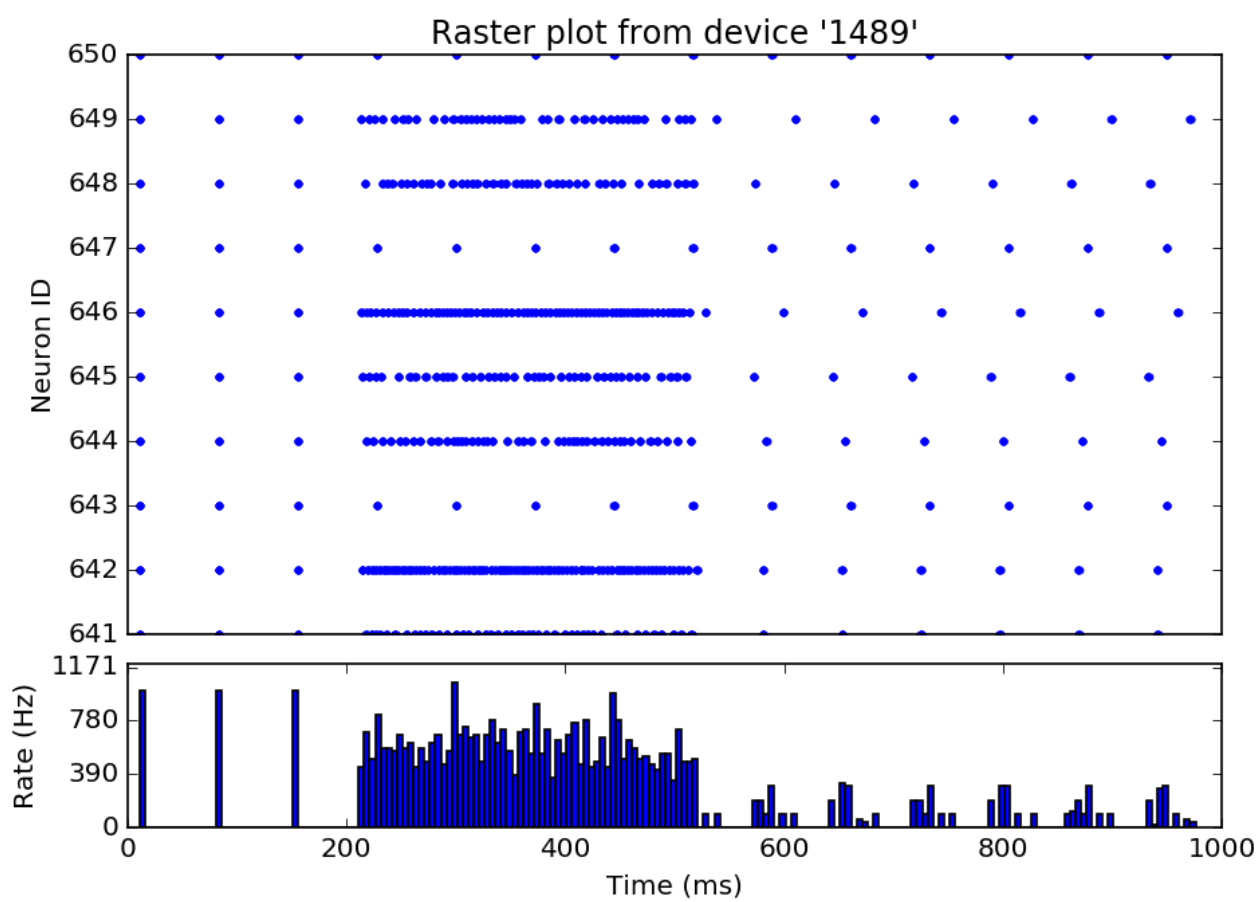


Рисунок 7. Нейронная активность в чувствительных клетках тела.

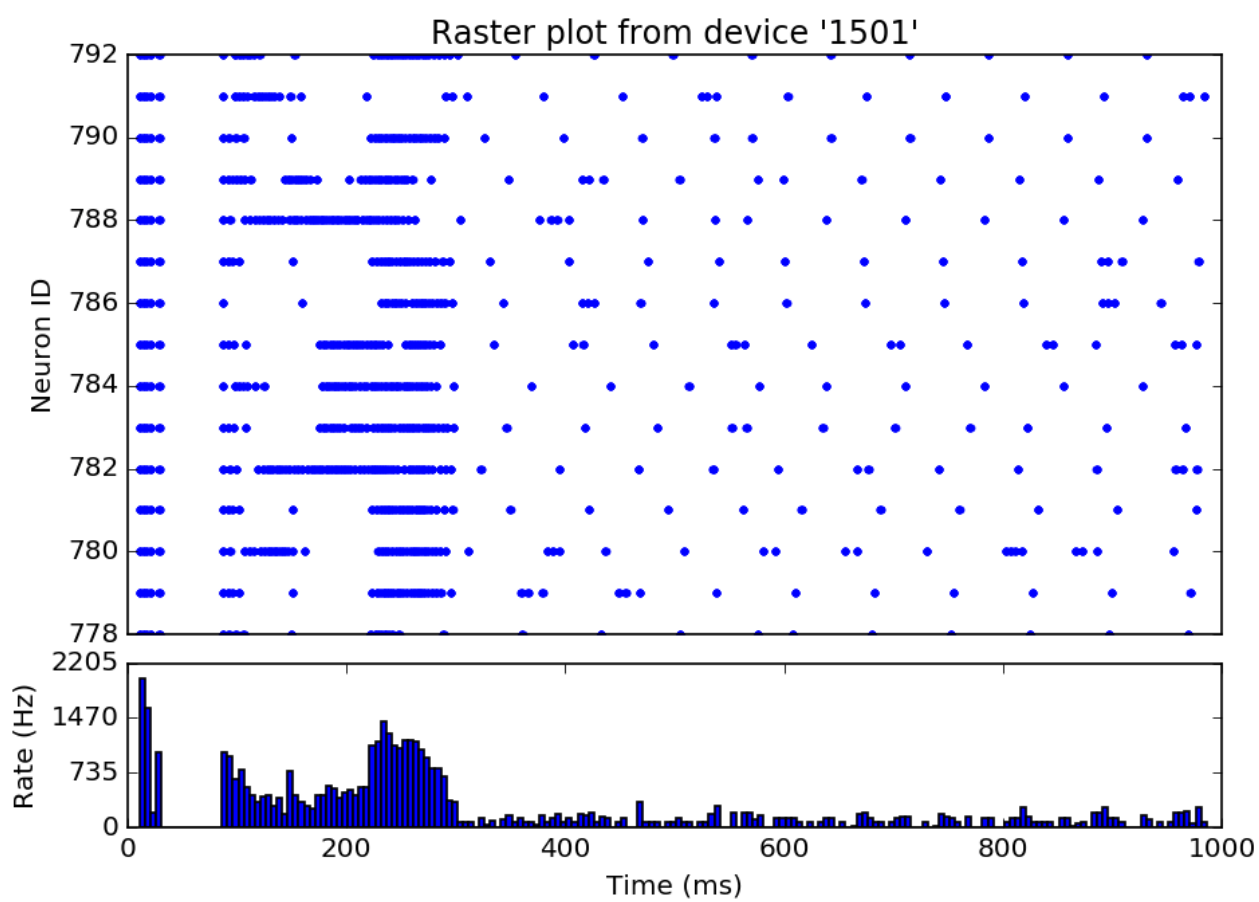


Рисунок 8. Нейронная активность в спинном мозгу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе постановки экспериментов в рамках данной работы была разработана симуляция ответственных за моторную подсистему областей мозга, и запущена вместе с системой эмоциональной оценки в контексте проекта когнитивной архитектуры NEUCOGAR.

5.5. Рекомендации к дальнейшему исследованию

Постановка экспериментов в малых масштабах несет с собой ограничение применимости суждений о работе данного подхода в целом при значительно больших масштабах. Полученный в результате код был запущен со следующими параметрами:

- 1000-10000 нейронов
- 30000-2000000 синапсов

Для дальнейшего исследования данной области необходимо масштабировать симуляцию на биологически реалистичное количество нейронов в мозге для достижения относительно точной репликации процессов в биологическом мозге в цифровой среде.

Также, для практической применимости полученных результатов к прикладной области информатики необходимо наличие в архитектуре системы восприятия состояния среды, с возможностью обучения агента выдаче «эмоциональной» реакции на определенные стимулы.

5.6. Перспективы применения

Полученная в результате программа оснащенного биологически инспирированной когнитивной архитектурой агента может быть использована для исследования:

- его поведения в целом
- поведения определенного рода среде
- механизмов адаптации к среде
- реакции на стимулы, вызывающие различные «эмоциональные» отклики
- для валидации данного подхода к проектированию интеллектуальных систем

5.7. Вывод

Разработка данного проекта позволила оценить необходимое для оперирования когнитивной архитектуры ресурсы вычислительной системы, включая затраченное процессорное время и используемую оперативную память.

Кроме этого, она также позволяет взглянуть на функционирование основных путей и функциональных блоков организации двигательной активности в соединении с функциональными элементами лимбической системы, включая эмоциональную составляющую. Влияние эмоциональных стимулов на обработку моторного вывода и ответной реакции на раздражитель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kunkel, Susanne, al. et.* NEST 2.12.0. // Zenodo. — 2017.
2. NEUCOGAR: когнитивная архитектура для биомиметического эмоционального ИИ / J. Vallverdu [и др.] // International Journal of AI. — 2016.
3. *Motor cortex.* Motor cortex — Wikipedia, The Free Encyclopedia. — 2017. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_cortex.
4. *Tsubo Y., Isomura Y., Fukai T.* Neural dynamics and information representation in microcircuits of motor cortex. // Front. Neural Circuits. — 2013.
5. The Corticospinal Tract: A Biomarker to Categorize Upper Limb Functional Potential in Unilateral Cerebral Palsy. / E. Jaspers [и др.] // Front. Pediatr. — 2016.
6. *Данилова Н., Крылова А.* Физиология высшей нервной деятельности. — 2001.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ТЕОРИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ЛИСТИНГИ ИСХОДНОГО КОДА

Код, необходимый для соединения различных восходящих и нисходящих путей с системой эмоциональной оценки.

1 миром

Описания основных путей передачи сигналов в коде.

```

1 # * * * * EFFERENT * * *
2 # * * * * CORTICOSPINAL TRACT * * *
3 # connect(motor[motor_Glu1], medulla[medulla_GABA], syn_type=GABA, weight_coef
   =0.01)
4 connectIn(motor[motor_Glu1], spine[spine_Glu1], syn_type=Glu)
5 connectIn(spine[spine_Glu1], nmj[nmj_Glu], syn_type=Glu)
6
7 # # * * * * CORTICOBULBAR TRACT * * *
8 connect(motor[motor_Glu0], medulla[medulla_GABA], syn_type=Glu)
9 # # * * * * RETICULOSPINAL TRACT * * *
10 connect(pons[pons_Glu], spine[spine_GABA], syn_type=Glu)
11 connect(medulla[medulla_GABA], spine[spine_GABA], syn_type=GABA)
12
13 # * * * * AFFERENT * * *
14 # * * * * SPINOTHALAMIC TRACT * * *
15 connect(cellBodies[cellBodies_Glu], spine[spine_Glu2], syn_type=Glu)
16 connect(spine[spine_Glu2], thalamus[thalamus_Glu], syn_type=Glu)

```

Код, необходимый для запуска основного эксперимента — 2.3.2

```

1 connect_generator(nts[nts_a1], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
2 connect_generator(nts[nts_a2], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
3 connect_generator(prh[prh_GABA], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
4 connect_generator(pgi[pgi_GABA], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
5 connect_generator(pgi[pgi_Glu], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
6 connect_generator(ldt[ldt_a1], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
7 connect_generator(ldt[ldt_a2], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
8 connect_generator(ldt[ldt_Ach], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
9 connect_generator(lc[lc_N0], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
10 connect_generator(lc[lc_N1], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
11
12 connect_generator(prefrontal[pfc_5HT], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
13 connect_generator(motor[motor_5HT], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
14 connect_generator(rn[rn_dr], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
15 connect_generator(rn[rn_mnr], 0., 250., rate=250, coef_part=1)
16

```



```
17 | connect_generator(cellBodies[cellBodies_Glu], 200., 500., rate=250, coef_part=1) |
```