Нейросимулятор NeuroSim-TM-2.0

(руководство пользователя)

Программа производит симуляцию спайковой[[1]](#footnote-1) активности сети точечных нейронов, соединённых связями (синапсами) в соответствии с выбранной пользователем топологией. Для каждого нейрона моделируется поведение его мембранного потенциала, для каждого синапса – состояние его синаптического ресурса и синаптического тока в каждый момент времени симуляции.

В NeuroSim-TM-2.0 поддерживаются:

* две модели динамики мембранного потенциал нейрона: Perfect Integrate-and-Fire (PIF) и Leaky Integrate-and-Fire (LIF)
* модель кратковременной синаптической пластичности Цодыкса-Узиеля-Маркрама (TUM)
* стимуляция спонтанной активности нейронов а) с помощью «фоновых» токов, либо б) стохастически
* возможность выбора топологии сети:
  + биномиальная топология (нейроны соединены случайно с одинаковой вероятностью образования связи P\_CON; связи не имеют длины и задержки распространения спайка)
  + пространственно-распределённая топология (нейроны располагаются на квадратной площадке единичного размера в соответствии c паттерном, выбранным пользователем из семи возможных, см. Таблицу 1; связи являются прямыми направленными отрезками, соединяющими нейроны, по которым спайки распространяются с постоянной скоростью)
* дополнительные опциональные механизмы, влияющие на спайковую активность сети:
  + корреляционная синаптическая пластичность STDP
  + механизм гомеостатической регуляции спайковой активности (имеется модулирующий все фоновые токи коэффициент M ∈ [0:M\_max], отражающий общий уровень глюкозы в системе; M релаксирует к M\_max, каждый спайк любого нейрона уменьшает M на величину b\*M, ослабляя таким образом стимуляцию фоновыми токами)
  + возможность отключения активности тормозящих нейронов в заданный момент времени
  + возможность отключения стимуляции (фоновых токов, либо стохастической) а) в заданный момент времени или б) по превышению заданного порога активности после заданного пользователем числа зарегистрированных популяционных пачек
  + добавление стохастического шума «фоновых» токов
  + строгое ограничение на длину связи в случае пространственного распределения нейронов
* автоматический вывод статических и динамических характеристик симуляции (см. также Выходные данные):
  + растр всех спайков всех нейронов за всё время симуляции (файл raster.txt)
  + усреднённая спайковая активность за всё время симуляции (файл activity.txt)
  + список всех созданных связей с конкретными значениями констант для каждого синапса (файл connections.txt)
  + значения фоновых токов или вероятности испускания спонтанного спайка для каждого нейрона
  + моменты детекции популяционных пачек, межпачечные интервалы (Interburst intervals, IBI)
  + усреднённые по всей сети значения синаптических ресурсов на протяжении всей симуляции
  + значения всех весов связей с заданным периодом (в случае включения пользователем механизма STDP)
* возможность загрузки сохранённых координат нейронов, синаптических параметров и параметров стимуляции для **точного воспроизведения произведённых ранее симуляций**

Главными результатами работы программы являются растр и график усреднённой спайковой активности сети, также выводятся другие параметры симуляции (см. Выходные данные).

Входные параметры задаются в файле input.txt, который должен находиться в одной папке с исполняемым файлом программы. Полный список параметров представлен в Таблице 1.

Также все файлы сохранённой топологии и распределения параметров стимуляции должны находиться **в одной папке** с исполняемым файлом.

**Формат файла входных параметров (input.txt)**

* Если программе не удалось прочитать файл input.txt, будет выведено сообщение о том, что файл не был найден, и предложение запустить программу с параметрами по умолчанию.
* Параметры задаются в начале строки, затем без пробела ставится знак ‘=’ и затем без пробела значение этого параметра. Все остальные символы игнорируются.
* Параметры могут присутствовать в файле в любом порядке. При многократном повторении одного и того же параметра программа возьмёт последнее упомянутое значение.
* Любой текст, не соответствующий имени параметра, а также параметры, после которых стоит пробел, воспринимаются программой как комментарий и игнорируются.
* Если параметр не указан в файле, он принимает значение по умолчанию. Полный список параметров и их значения по умолчанию указаны в Таблице 1.

**Формат файла с сохранённой топологией сети (saved\_connections.txt)**

* Данные из этого файла считываются, если в input.txt задан параметр use\_saved\_topology=1
* В файле топологии задаётся список всех связей сети построчно в формате (PRE\_ID, POST\_ID, PROB), где PRE\_ID – номер пресинаптического нейрона, POST\_ID – номер постсинаптического нейрона, PROB – случайное число от 0 до 1, которое было задано для этой связи при генерации топологии (и которое оказалось меньше P\_con – вероятности образования связи).
* Если номер нейрона записывается со знаком ‘-‘ (минус), это означает, что нейрон тормозящий, в обратном случае – возбуждающий.
* Если при чтении файла возникнет несоответствие с типом нейрона (возбуждающий\тормозящий), взятого из файла с распределением параметров стимуляции, программа выдаст ошибку и номер нейрона, у которого было найдено это несоответствие.
* Если в файле количество записей не соответствует количеству нейронов из input.txt, программа выдаст ошибку.

**Формат файла с сохранёнными синаптическими параметрами (saved\_synaptic\_parameters\_distribution.txt)**

* Данные из этого файла считываются, если в input.txt задан параметр use\_saved\_synaptic\_patameters=1
* В файле синаптических параметров задаётся список всех связей сети построчно в формате (PRE\_ID, POST\_ID, A, U, tau\_I, tau\_rec, tau\_facil), где PRE\_ID – номер пресинаптического нейрона, POST\_ID – номер постсинаптического нейрона, A – амплитуда синаптического тока (если пресинаптический нейрон тормозящий, то A<0), параметр U и три временные константы всегда должны быть неотрицательными.
* В случае любых несоответствий во входных параметрах программа выдаст ошибку.

**Формат файлов сохранённых параметров стимуляции нейронов (saved\_exc\_I\_distribution.txt, saved\_inh\_I\_distribution.txt, saved\_p\_sp\_distribution.txt)**

* Данные из этих файлов считываются в случае, если в input.txt задан параметр use\_saved\_stimulation\_data=1
* Формат всех трёх файлов (N\_NUM, VALUE), построчно через пробел записывается номер нейрона и значение величины. При этом в случае фоновых токов происходит переназначение типов нейронов на основании данных из файлов (возбуждающие/тормозящие)
* Если суммарное количество записей из файлов не соответствует количеству нейронов из input.txt, программа выдаст ошибку.

**Формат файлов сохранённых координат нейронов (saved\_coordinates.txt)**

* Данные из файла считываются, если в input.txt задан параметр use\_saved\_coordinates=1
* Формат файла (X, Y), построчно через пробел записываются пары координат, определяющие положение каждого нейрона.
* Если в файле количество записей не соответствует количеству нейронов из input.txt, программа выдаст ошибку.

**Выходные данные**

В результате работы программа создаёт и заполняет следующие файлы (в алфавитном пордяке):

* activity.txt – усреднённая спайковая активность сети. Построчно выводится время симуляции и значение активности.
* burst\_times.txt – времена детекции популяционных пачек
* connections.txt – файл с использованной при симуляции топологией (прочитанной из файла, либо заново сгенерированной, см. Формат файла input.txt).
* connections\_per\_neuron.txt – файл с суммарным количеством исходящих связей для каждого нейрона.
* сoordinates.txt – файл с координатами нейронов
* exc\_I\_distribution.txt, inh\_I\_distribution.txt – значения фоновых токов для каждого нейрона сети, построчно, отдельно для возбуждающих и тормозящих нейронов.
* IBI.txt – файл с межпачечными интервалами (Interburst intervals).
* info.txt – файл, повторяющий структуру input.txt, в который после завершения симуляции выводятся значения основных параметров, с которыми была проведена симуляция.
* M.txt – динамика параметра М, отвечающего за гомеостатическую регуляцию.
* p\_sp\_distribution.txt – вероятности спонтанной генерации спайка на каждом шаге симуляции для каждого нейрона сети, построчно для каждого нейрона.
* raster.txt – растр активности сети, где построчно выводится время возникновения спайка и номер нейрона, испустившего этот спайк.
* synaptic\_parameters\_distribution.txt – файл с использованной при симуляции топологией (прочитанной из файла, либо заново сгенерированной, см. Формат файла input.txt).
* в папке /syn\_resource\_dynamics/ файлы x.txt, y.txt, z.txt, u.txt с динамикой средних по сети значений синаптических ресурсов
* в папке /stdp\_w\_dynamics/ файлы w#.txt, в каждый из которых выводятся значения всех весов, где # является порядковым номером файла. Если выбран тип пространственного распределения нейронов «гантель» (BARBELL), то файлы с распределением весов связей помещаются в дополнительно создаваемые подпапки L и R в папке /stdp\_w\_dynamics/, отвечающие связям, направленным в сторону одной из половин «гантели».

Таблица 1 – Полный список входных параметров в файле input.txt и их значения по умолчанию

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Имя параметра** | **Значение по умолчанию** | **Описание** |
| use\_saved\_topology | 0 | Загружать ли файл сохранённой топологии  (0 – нет, 1 – да) |
| use\_saved\_stimulation\_data | 0 | Загружать ли файл(ы) сохранённых параметров стимуляции (0 – нет, 1 – да) |
| use\_saved\_synaptic\_parameters | 0 | Загружать ли файл сохранённых синаптических параметров (0 – нет, 1 – да) |
| use\_saved\_coordinates | 0 | Загружать ли файл сохранённых координат нейронов (0 – нет, 1 – да) |
| Основные параметры симуляции | | |
| N | 500 | Количество нейронов в сети |
| Inh\_neurons\_fraction | 0.2 | Доля тормозящих нейронов |
| dt | 0.05 | (мс) Шаг по времени |
| AVG\_TIME | 2 | (мс) Интервал усреднения активности |
| SIM\_TIME | 3000 | (мс) Время симуляции сети |
| burst\_threshold | 0.1 | Порог активности для детекции популяционной пачки |
| Параметры топологии | | |
| P\_con | 0.1 | Вероятность образования односторонней связи между парой нейронов­\* |
| lambda | 0.01 | (L) Параметр в формуле для вероятности образования связи (pij = exp(-rij/lambda))­­[[2]](#footnote-2)\*\* |
| spike\_speed | 0.2 | (L/мс) Скорость распространения спайка по аксону\*\* |
| tau\_delay | 0.2 | (мс) Базовая аксональная задержка\*\* |
| max\_conn\_length | 1.4142 | (L) Ограничение на длину связи\*\* |
| spatial\_layer\_type | 0 | Паттерн топологии сети  0 – «биномиальный» (BINOMIAL)  1 – однородный (UNIFORM)  2 – в узлах квадратной решётки (SQUARE LATTICE)  3 – «полосатый» (STRIPED)  4 – «колокол» (BELL)  5 – «рамп» (RAMP)  6 – «двойной рамп» (DOUBLE RAMP)  7 – «гантель» (BARBELL) |
| Параметры модели нейрона (RIF, LIF) | | |
| neuron\_model | 1 | Выбор модели нейрона (0 – RIF, 1 – LIF) |
| V\_REST | 0 | (мВ) Потенциал покоя |
| V\_RESET | 13.5 | (мВ) Установочное значение мембранного потенциала после спайка |
| V\_TH | 15 | (мВ) Пороговое значение мембранного потенциала (порог генерации спайка) |
| TAU\_M | 20 | (мс) Константа релаксации мембранного потенциала (LIF) |
| R\_IN | 1 | (ГОм) Сопротивление мембраны (LIF) |
| C\_M | 20 | (пФ) Ёмкость мембраны (RIF) |
| Параметры синапса (TUM) | | |
| Aee | 38 | (пА) Амплитуды синаптического тока\*\*\* |
| Aei | 54 |
| Aie | -72 |
| Aii | -72 |
| Uee | 0.5 | Амплитуды приращения активного синаптического ресурса из восстановленного в случае прихода пресинаптического спайка\*\*\* |
| Uei | 0.5 |
| Uie | 0.04 |
| Uii | 0.04 |
| tau\_rec\_ee | 800 | (мс) Константы релаксации восстановленного синаптического ресурса\*\*\* |
| tau\_rec\_ei | 800 |
| tau\_rec\_ie | 100 |
| tau\_rec\_ii | 100 |
| tau\_facil\_ie | 1000 | (мс) Константы релаксации вспомогательной переменной модели синапса\*\*\* |
| tau\_facil\_ii | 1000 |
| tau\_I | 3 | (мс) Константа релаксации активного синаптического ресурса (прим.: «i» – заглавная, а не «L» маленькая) |
| Параметры стимуляции активности сети | | |
| Stimulation\_type | 1 | Тип стимуляции:  1 – нормальное распределение фоновых токов  2 – два значения фонового тока (I\_bg\_1 и I\_bg\_2)  3 – нормальное распределение вероятности спонтанной генерации спайка  4 – два значения вероятности спонтанной генерации спайка (p\_sp\_1 и I\_sp\_2) |
| I\_bg\_mean | 7.7 | (пА) Параметры нормального распределения фоновых токов (тип стимуляции 1) |
| I\_bg\_sd | 4.9 |
| I\_bg\_min | 0 |
| I\_bg\_max | 20 |
| I\_bg\_1 | 22 | (пА) Значения фоновых токов (тип стимуляции 2) |
| I\_bg\_2 | 9 |
| Fraction\_of\_neurons\_with\_I\_bg\_1 | 0.25 | Доля нейронов с I\_bg\_1 (тип стимуляции 2) |
| P\_SP\_mean | 0.00001 | Параметры нормального распределения вероятности генерации спонтанного спайка (тип стимуляции 3) |
| P\_SP\_sd | 0.000005 |
| P\_SP\_min | 0 |
| P\_SP\_max | 0.001 |
| I\_bg\_1 | 22 | Значения двух вероятностей спонтанной генерации спайка (тип стимуляции 4) |
| I\_bg\_2 | 9 |
| Fraction\_of\_neurons\_with\_p\_sp\_1 | 0.25 | Доля нейронов с p\_sp\_1 (тип стимуляции 4) |
| **Параметры дополнительных механизмов** | | |
| Шум «фоновых» токов | | |
| I\_bg\_noise\_mode | 0 | 0 – выключен, 1 – включен |
| I\_bg\_noise\_sd | 0 | (пА) Величина отклонения от постоянного значения |
| Отключение стимуляции | | |
| stim\_disable\_protocol | 0 | Тип протокола отключения стимуляции:  0 – отключён,  1 – отключение стимуляции по превышению порога активности в заданной популяционной пачке  2 – отключение стимуляции в заданный момент времени |
| pb\_number | 2 | Номер популяционной пачки (тип 1) |
| activity\_threshold | 0.2 | Порог активности (тип 1) |
| stim\_off\_time | 1400 | (ms) Момент отключения стимуляции (тип 2) |
| Отключение тормозящих нейронов | | |
| inh\_off\_time | -1 | (мс) Протокол отключения торможения  -1 – отключён  [0-SIM\_TIME] – момент отключения активности тормозящих нейронов |
| STDP | | |
| STDP\_status | 0 | 0 – STDP отключено  1 – Аддитивное правило STDP  2 – Мультипликативное правило STDP |
| W\_OUTPUT\_PERIOD | 500 | (мс) Период вывода весов связей |
| A\_plus | 0.01 | Амплитуды изменения весов |
| A\_minus | 0.01 |
| w\_initial | 0.5 | Начальное значение весов |
| tau\_plus\_corr | 20 | (мс) Временные константы |
| tau\_minus\_corr | 20 |
| Гомеостатическая регуляция | | |
| Homeostasis\_status | 0 | 0 – механизм отключён  1 – механизм включён |
| b | 1/N | Коэффициент влияния единичного спайка на уровень глюкозы |
| M\_max | 1 | Максимальное значение уровня глюкозы |

1. спайк (или потенциал действия) – электрический импульс, испускаемый нейроном, отправляющийся по всем исходящим связям к другим нейронам [↑](#footnote-ref-1)
2. \* Параметр применяется в случае «биномиальной» (BINOMIAL) топологии сети

   \*\* Параметры применяются в случае пространственно-зависимой топологии сети

   \*\*\* Обозначения ee, ie, ei и ii показывают типы пре- и постсинаптического нейронов, которые могут быть возбуждающими (e – excitatory) и тормозящими (i – inhibitory) [↑](#footnote-ref-2)