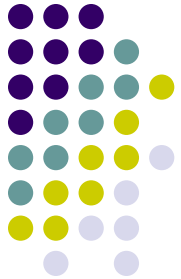


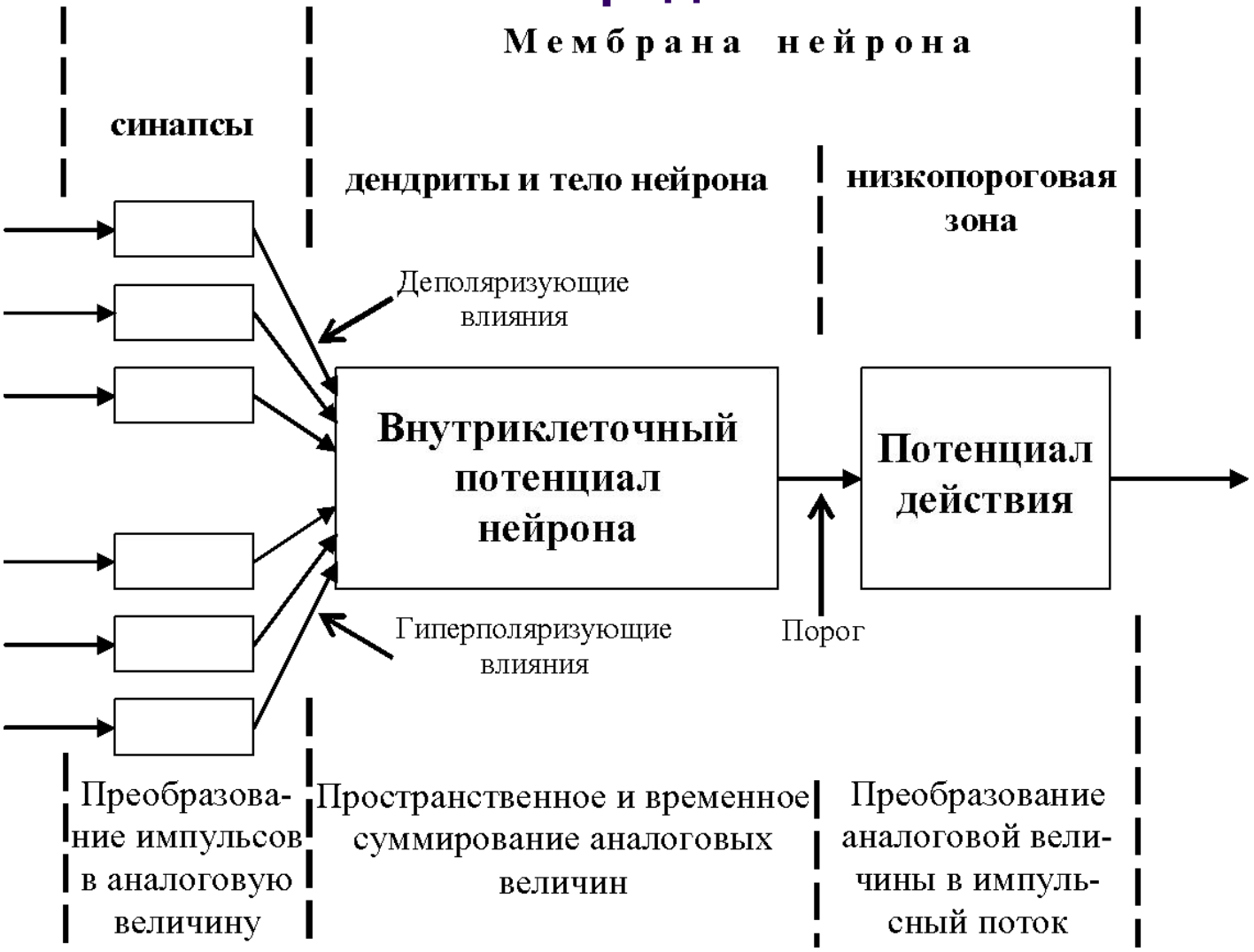
Моделирование естественного нейрона, как системы преобразования импульсных потоков

С.П. Романов, д.б.н, вед. науч. сотр.,
Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН

А.В. Бахшиев, вед. программист,
ЦНИИ Робототехники и технической кибернетики

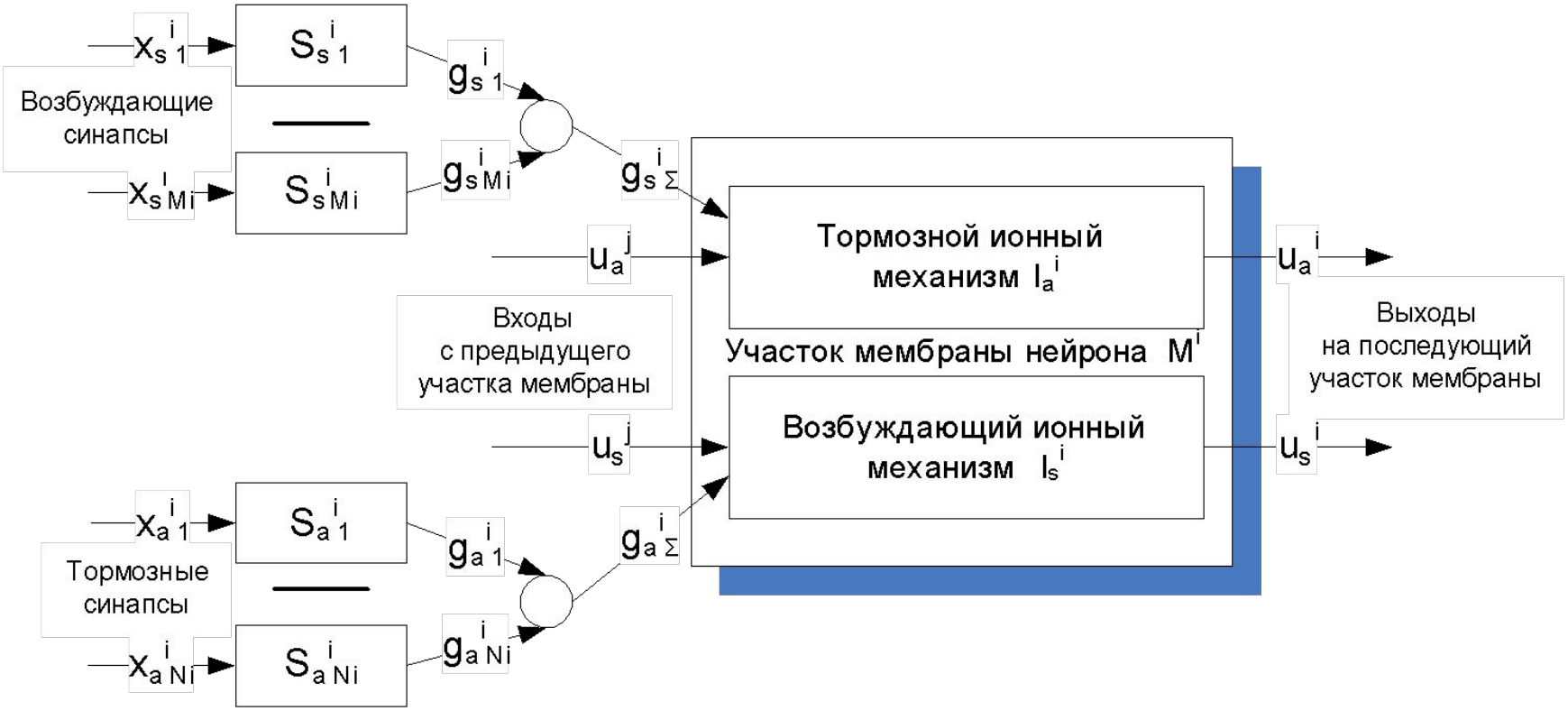
www.ailab.ru

Функциональная схема основных процессов преобразования импульсных потоков в нейроне с химической передачей

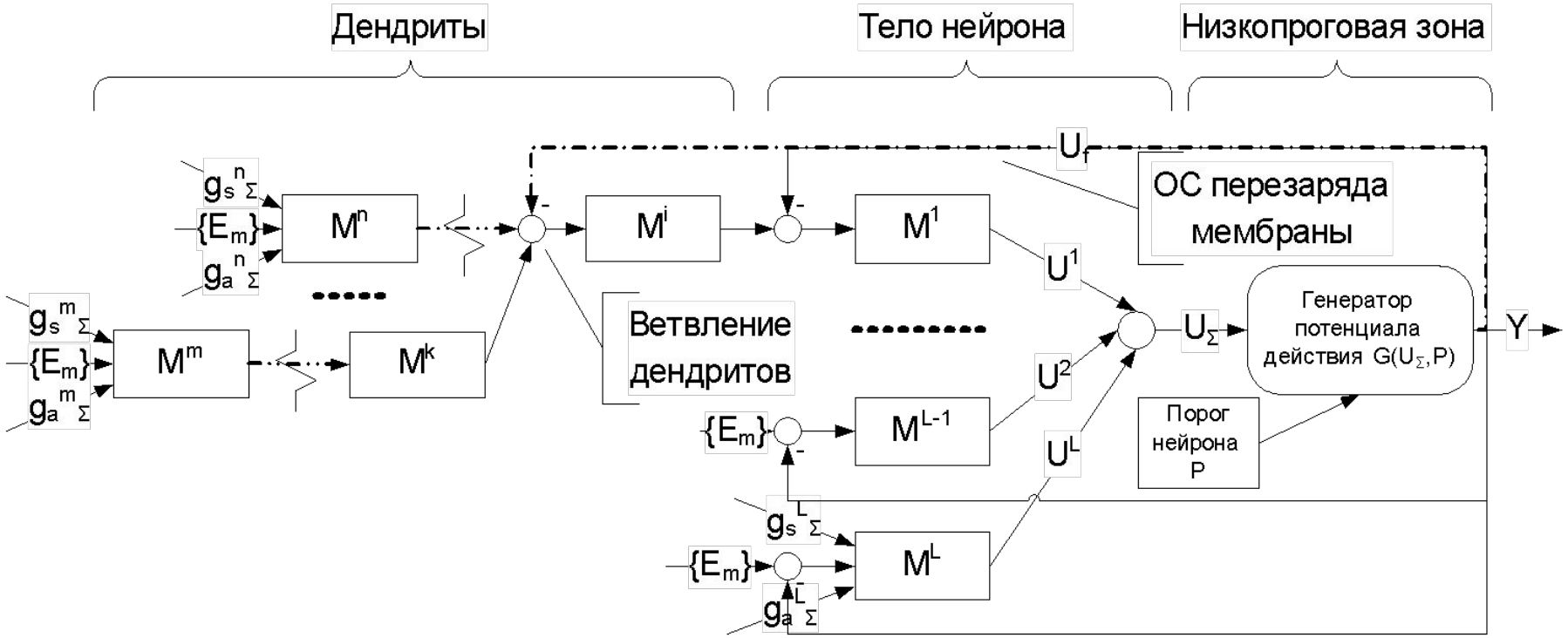


Функциональная схема модели нейрона

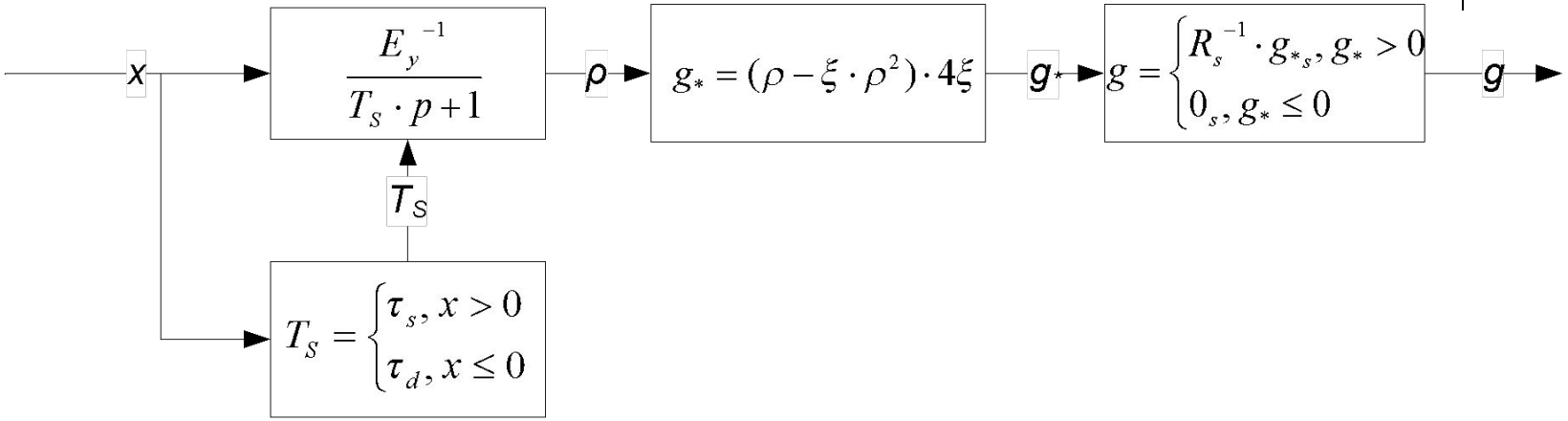
Функциональная схема модели *i*-го участка мембраны нейрона *Mi*



Организация структуры мембраны нейрона



Модель синапса с химической передачей



τ_s - постоянная времени выделения медиатора,

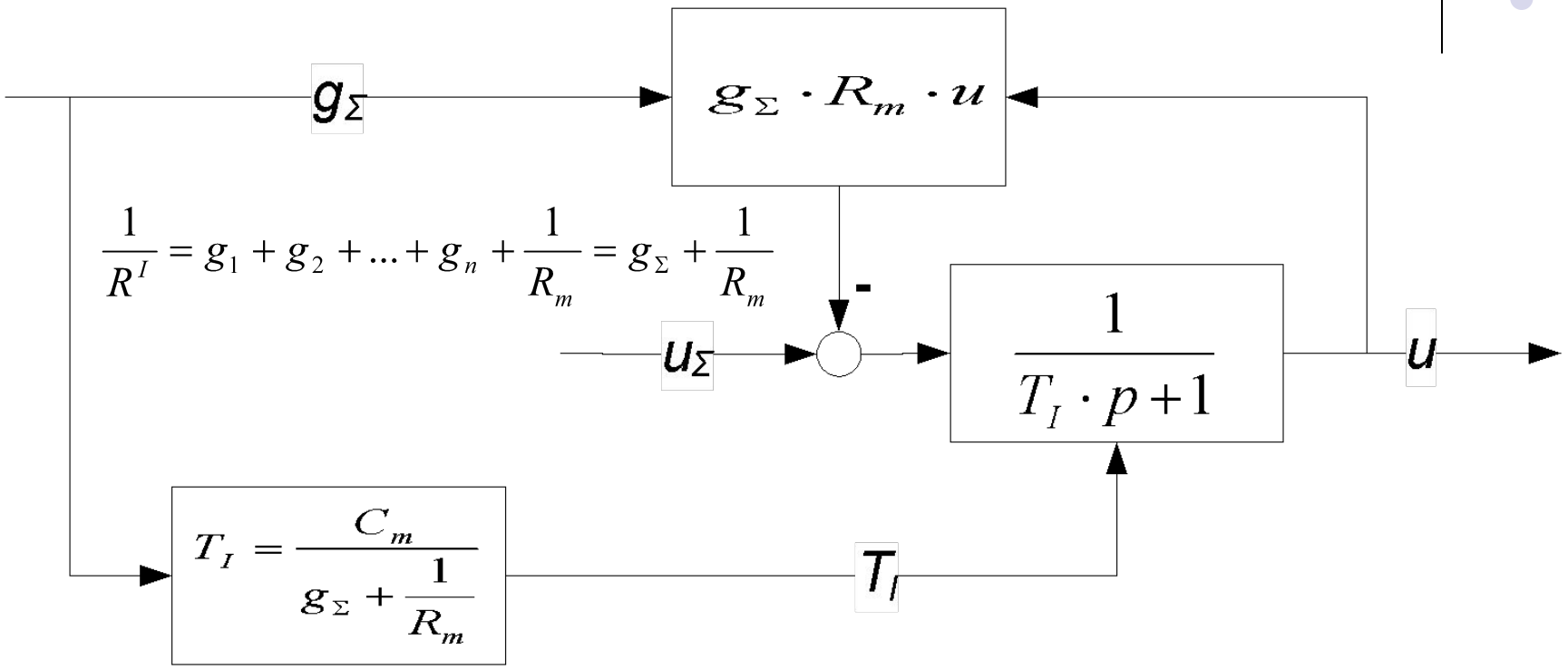
τ_d - постоянная времени распада медиатора,

ξ - критическое значение концентрации медиатора, при котором начинает сказываться эффект пресинаптического торможения,

$R_S > 0$ - сопротивление синапса ("вес") – характеризует эффективность воздействия синапса на ионный механизм.

E_y - амплитуда входного сигнала.

Модель ионного механизма мембраны



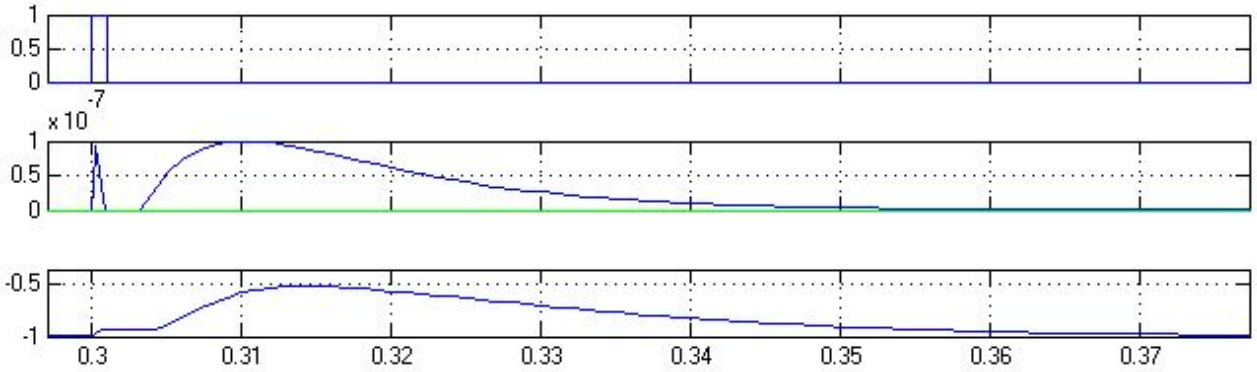
g_Σ - суммарная эффективность влияния синапсов на ионный механизм,

$R_m > 0$ - сопротивление мембраны,

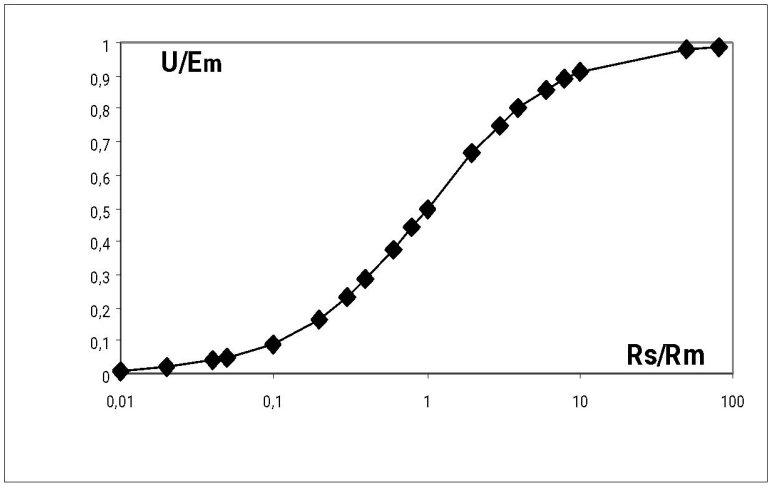
$C_m > 0$ - емкость мембраны,

u_Σ - ожидаемый вклад модели в величину внутриклеточного потенциала при отсутствии внешнего возбуждения. Данная величина определяется активностью соседних участков мембраны.

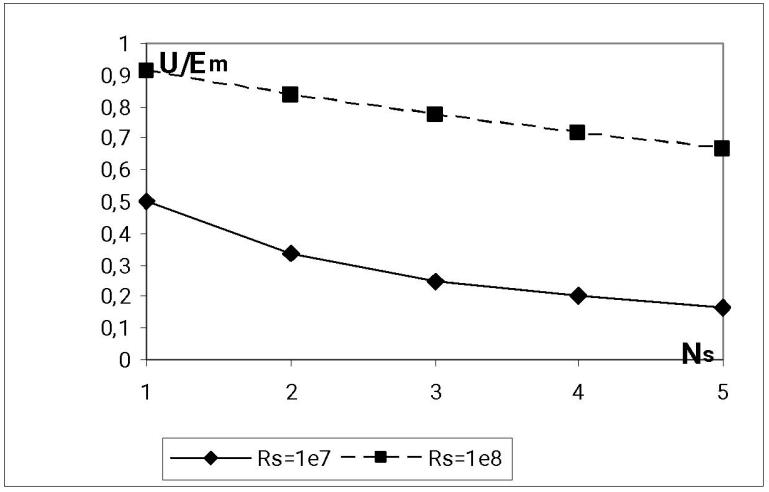
Эффективность синаптической передачи



Влияние синапса на мембрану во времени

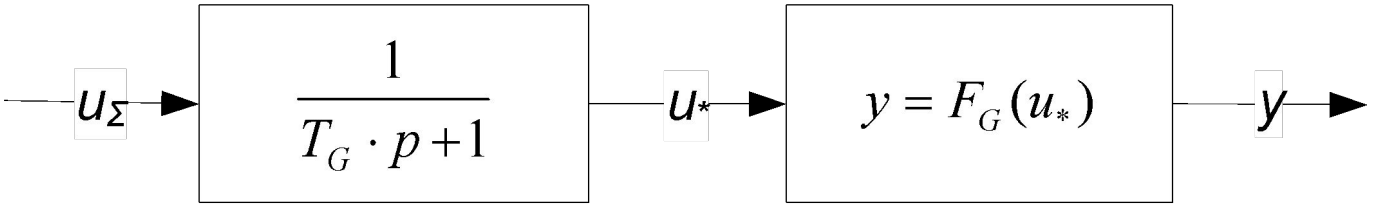


Зависимость эффективности от отношения сопротивлений



Зависимость эффективности от числа синапсов

Генератор потенциала действия

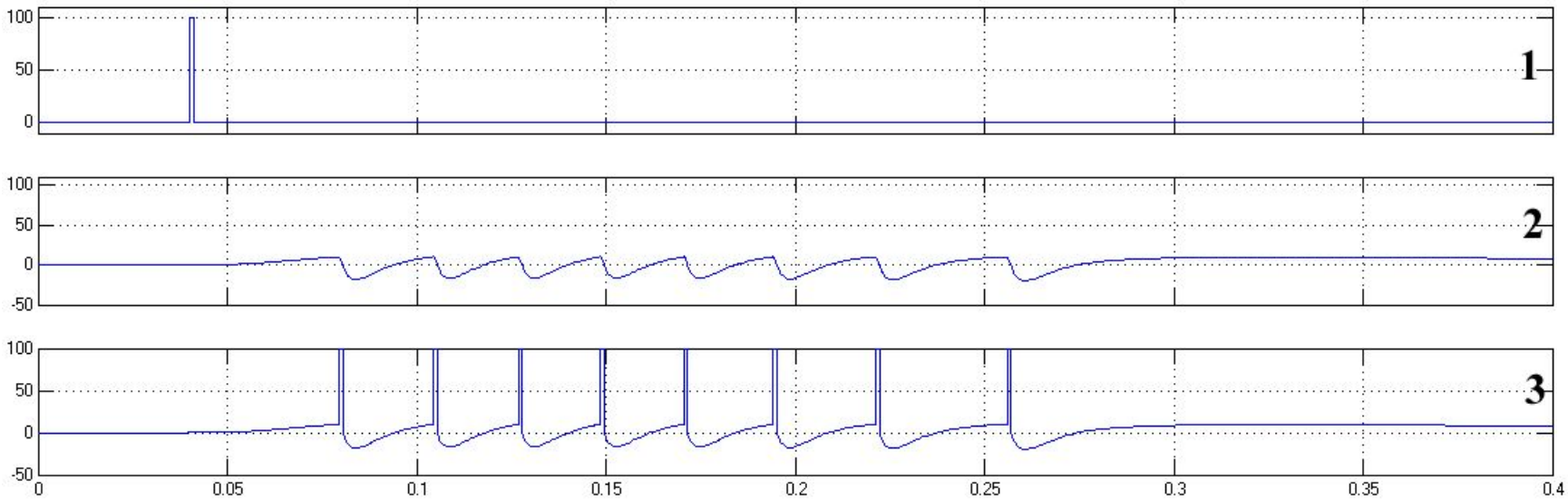


$P>0$ – порог нейрона;

T_G – постоянная времени, определяющая время действия обратных связей перезаряда мембраны и характеризующая длительность генерируемого импульса;

$$y = F_G(u_*) = \begin{cases} E_y, \text{ при} \begin{cases} u_* \in (0,P), \dot{u}_* < 0, \\ u_* \geq P, \end{cases} \\ 0, \text{ при} \begin{cases} u_* \in (0,P), \dot{u}_* \geq 0, \\ u_* \leq 0. \end{cases} \end{cases}$$

Простейшие реакции модели нейрона

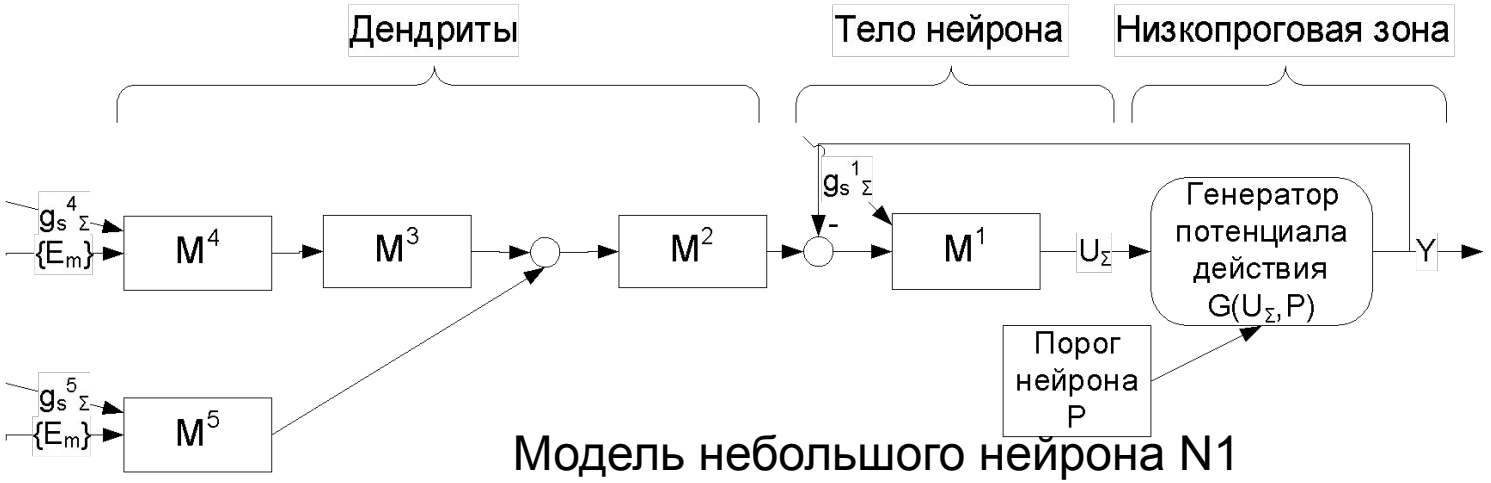


1 – возбуждающие воздействие

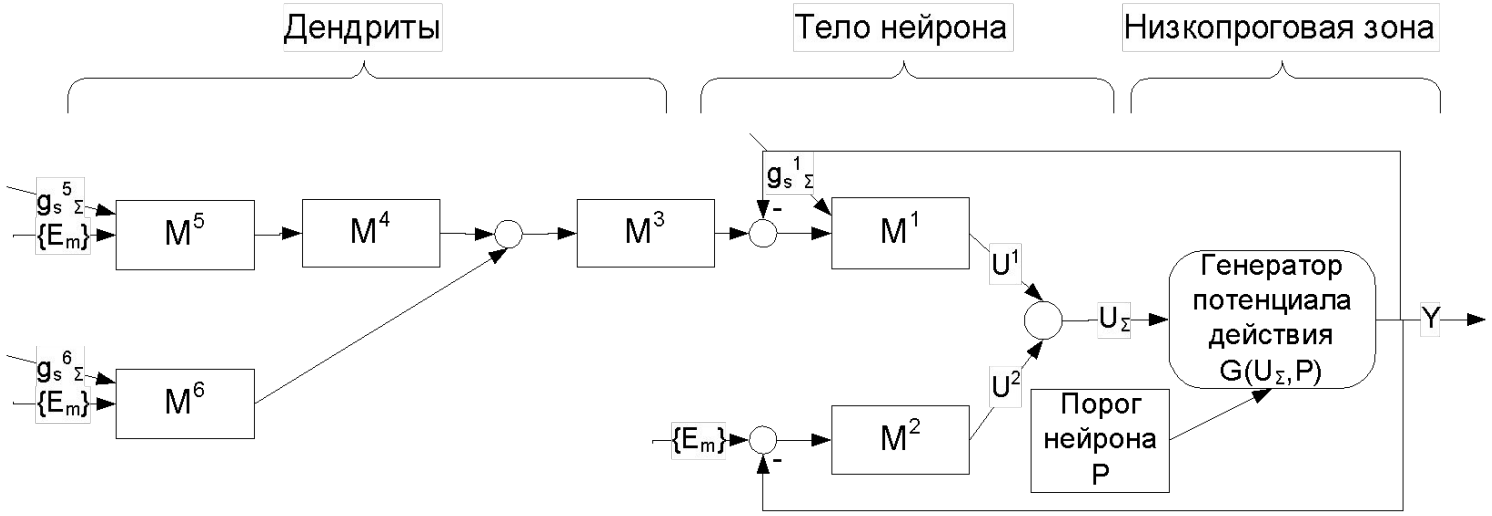
2 – внутриклеточный потенциал мембраны на генераторе потенциала действия

3 – ответы нейрона совмещенные с графиком внутриклеточного потенциала

Модели небольшого и крупного нейронов

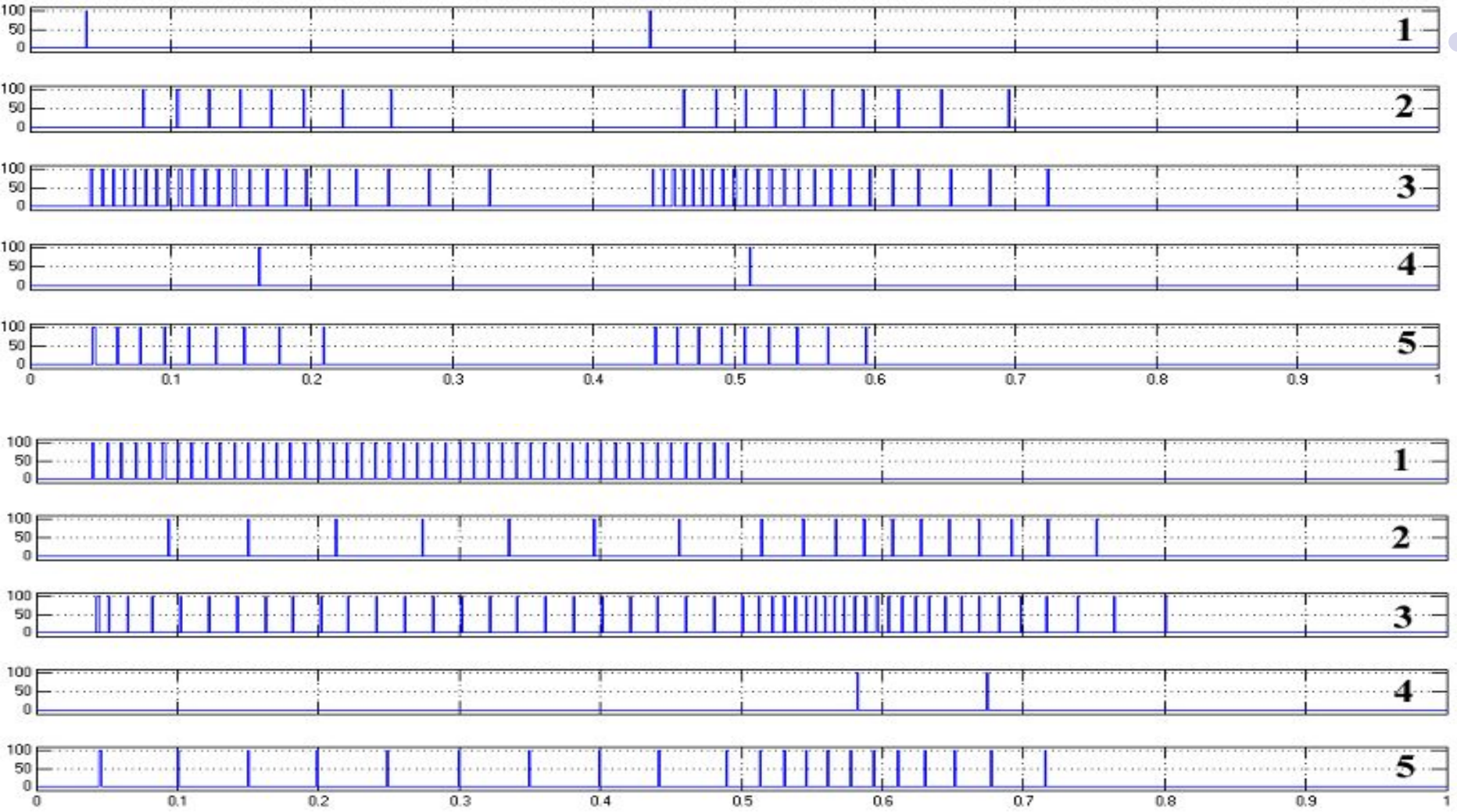


Модель небольшого нейрона N1



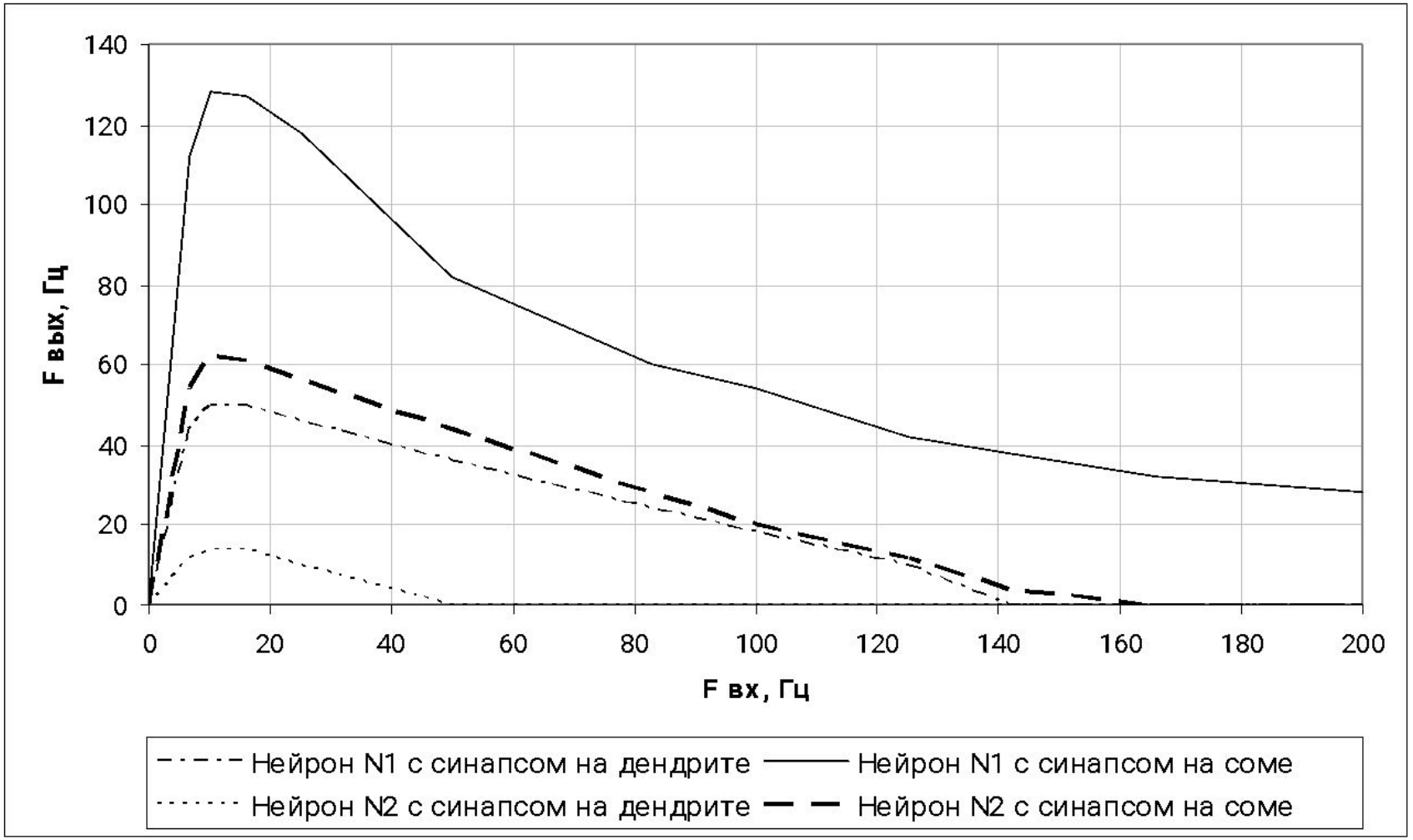
Модель крупного нейрона N2

Реакции моделей нейронов

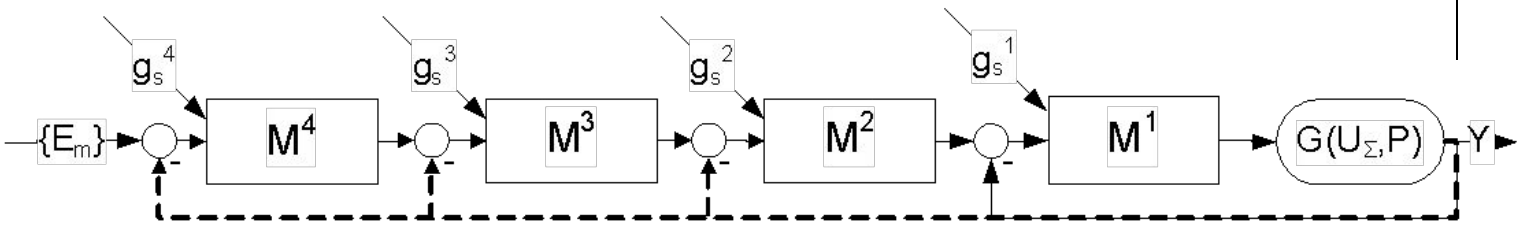


Реакции небольшого N1 (2, 3) и крупного N2 (4, 5) нейронов
с синапсами на дендрите (2, 4) и соме (3, 5) в ответ на входное воздействие (1)
частотой 2.5 и 100 Гц

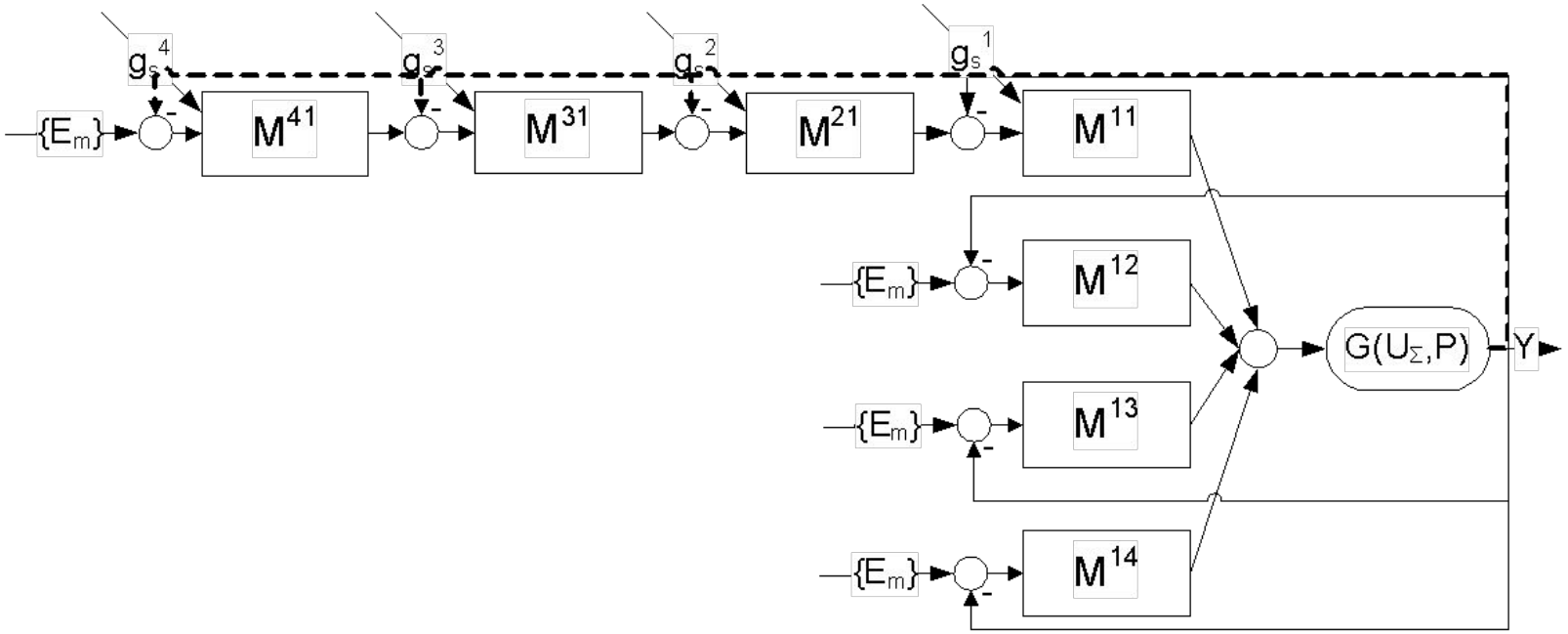
Зависимость частоты ответов модели нейрона от частоты входной последовательности



Модели нейронов различных размеров

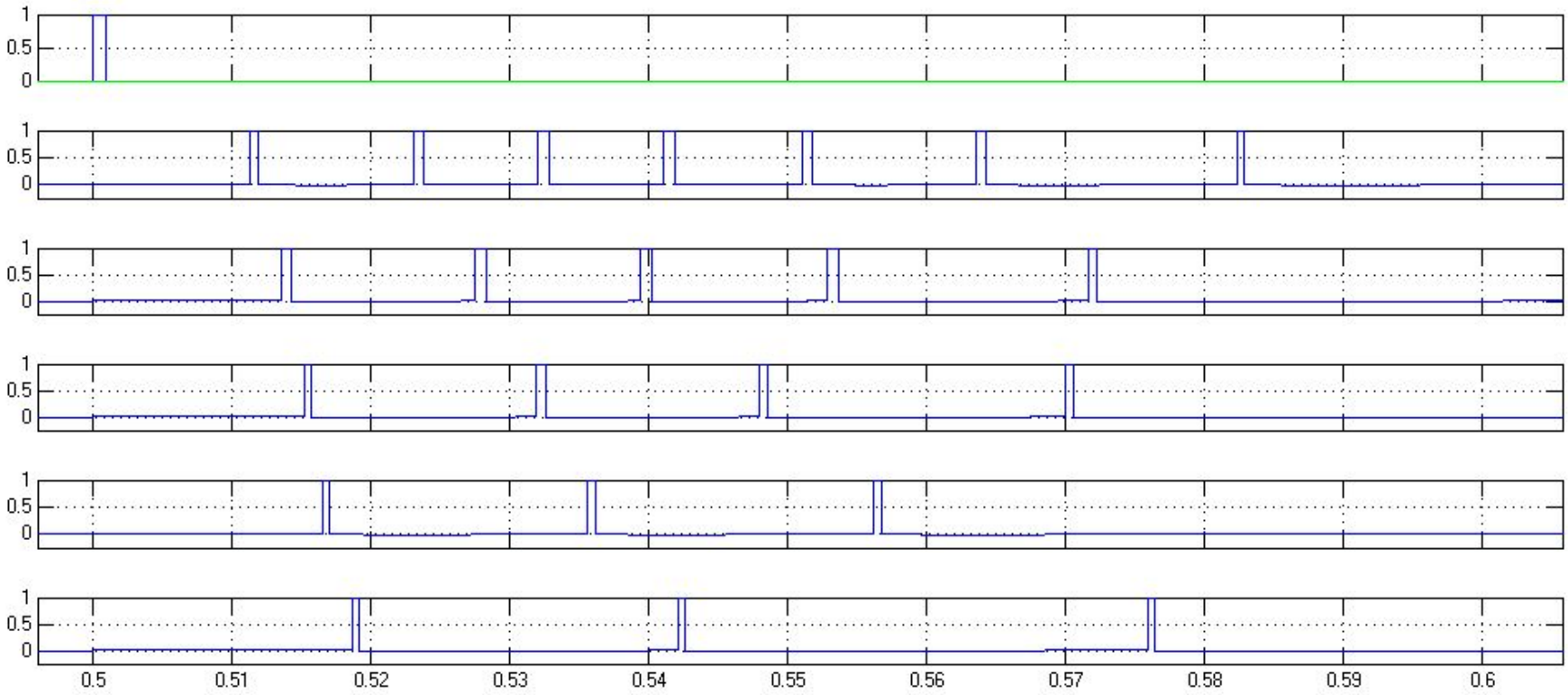


N_3 - Малый (пейсмекерный) нейрон

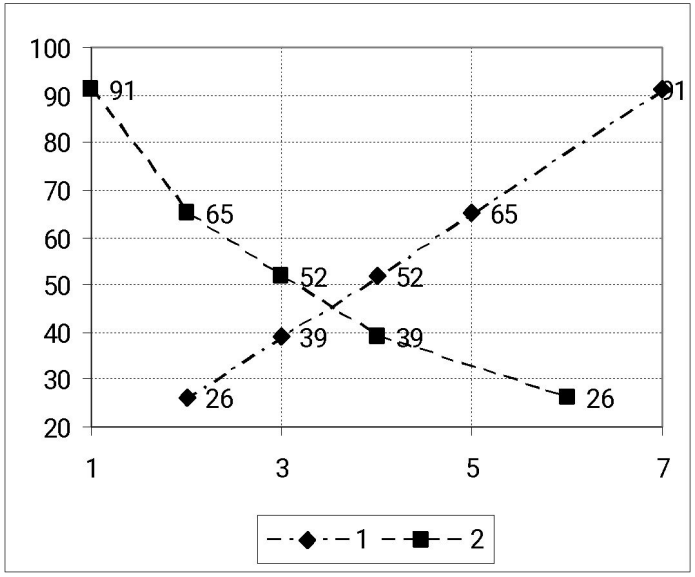


N_4 - Крупный (пейсмекерный) нейрон

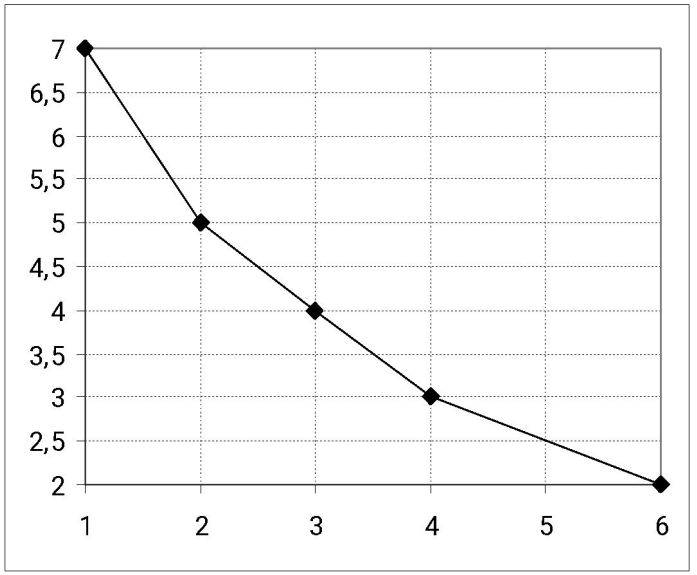
Реакции моделей нейронов различного размера



Частота разрядов нейрона в зависимости от размера

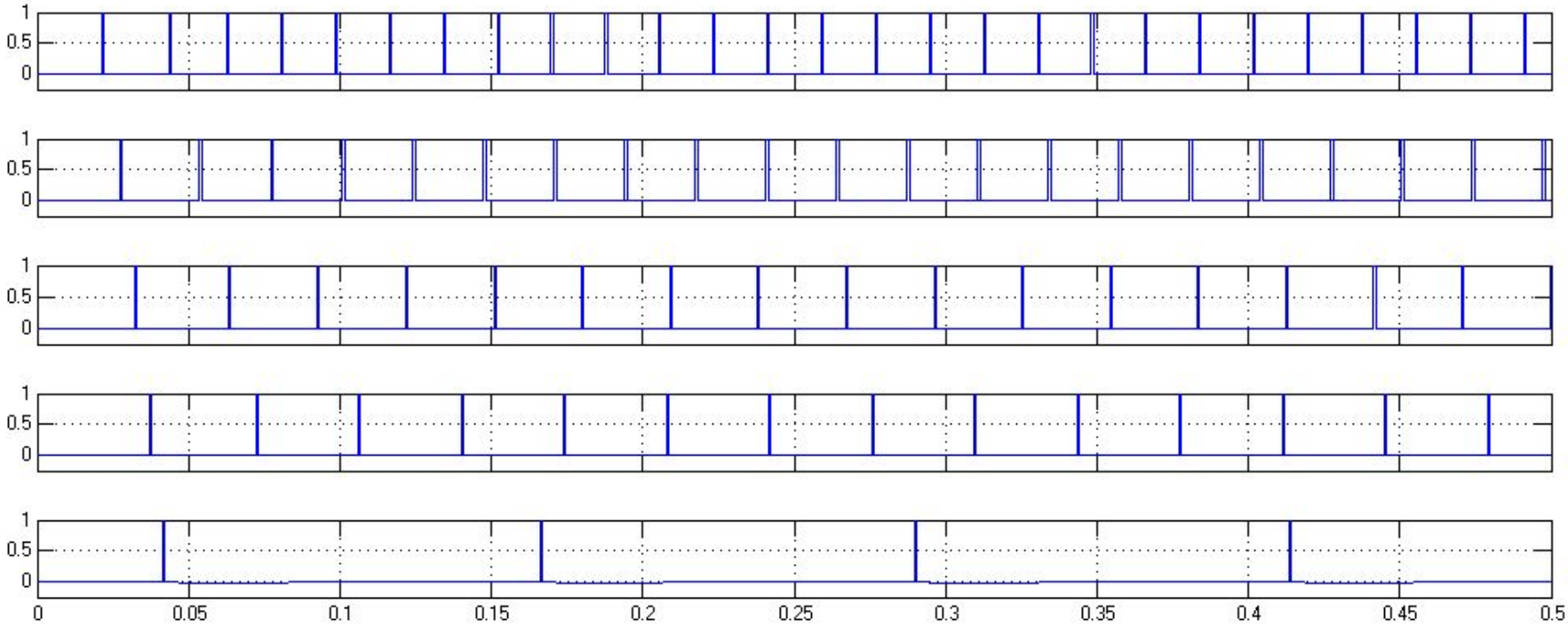


1 – зависимость средней частоты от числа импульсов в пачке
2 – зависимость средней частоты от числа участков сомы

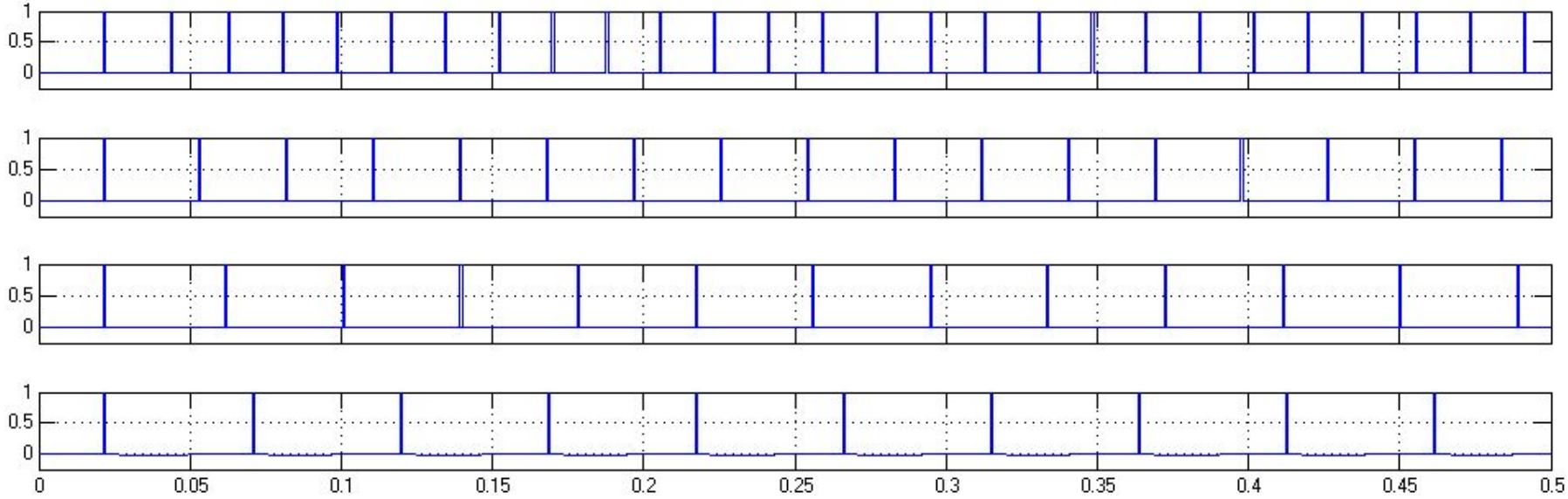


Зависимость числа импульсов в пачке от числа участков сомы

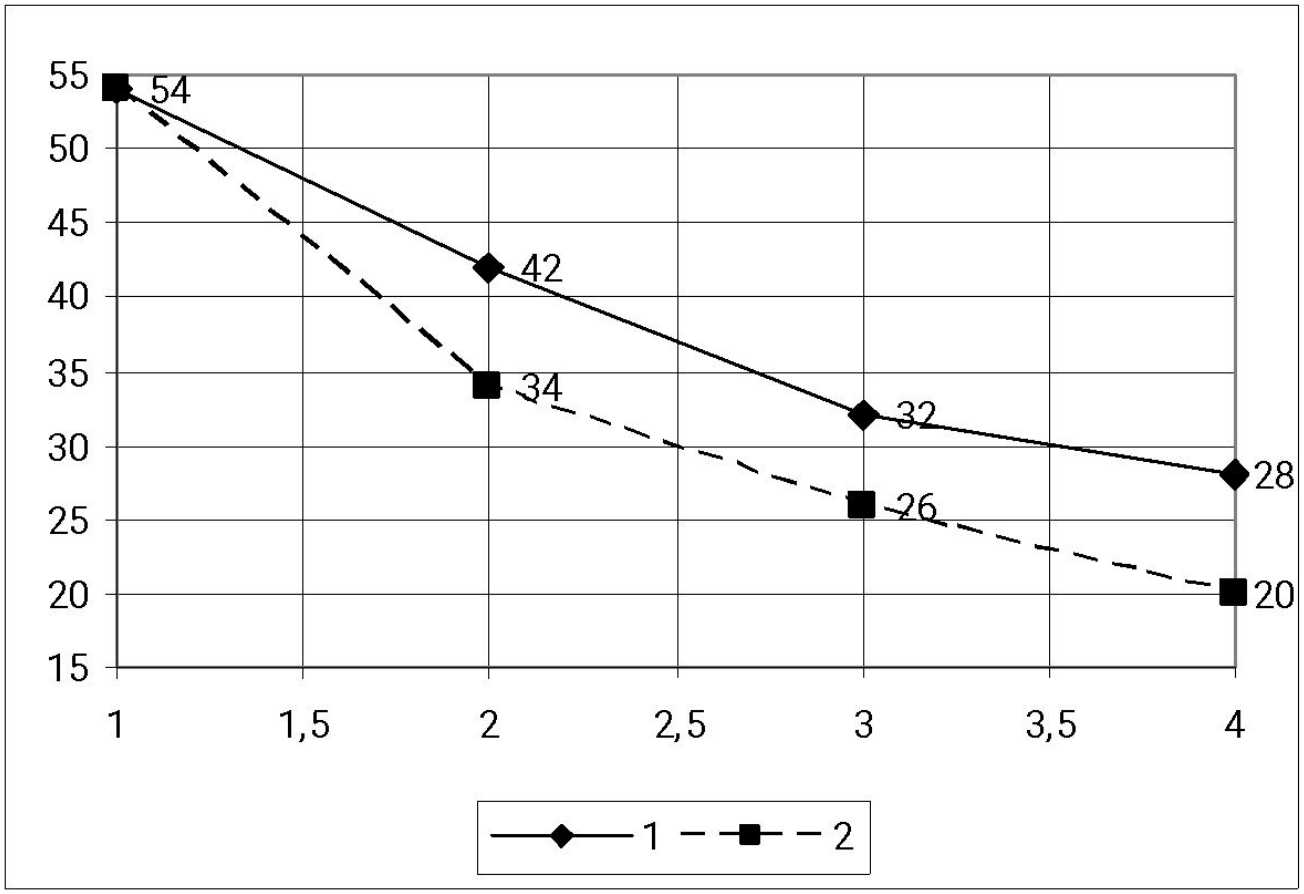
Пейсмекерные нейроны – часть 1



Пейсмекерные нейроны – часть 2

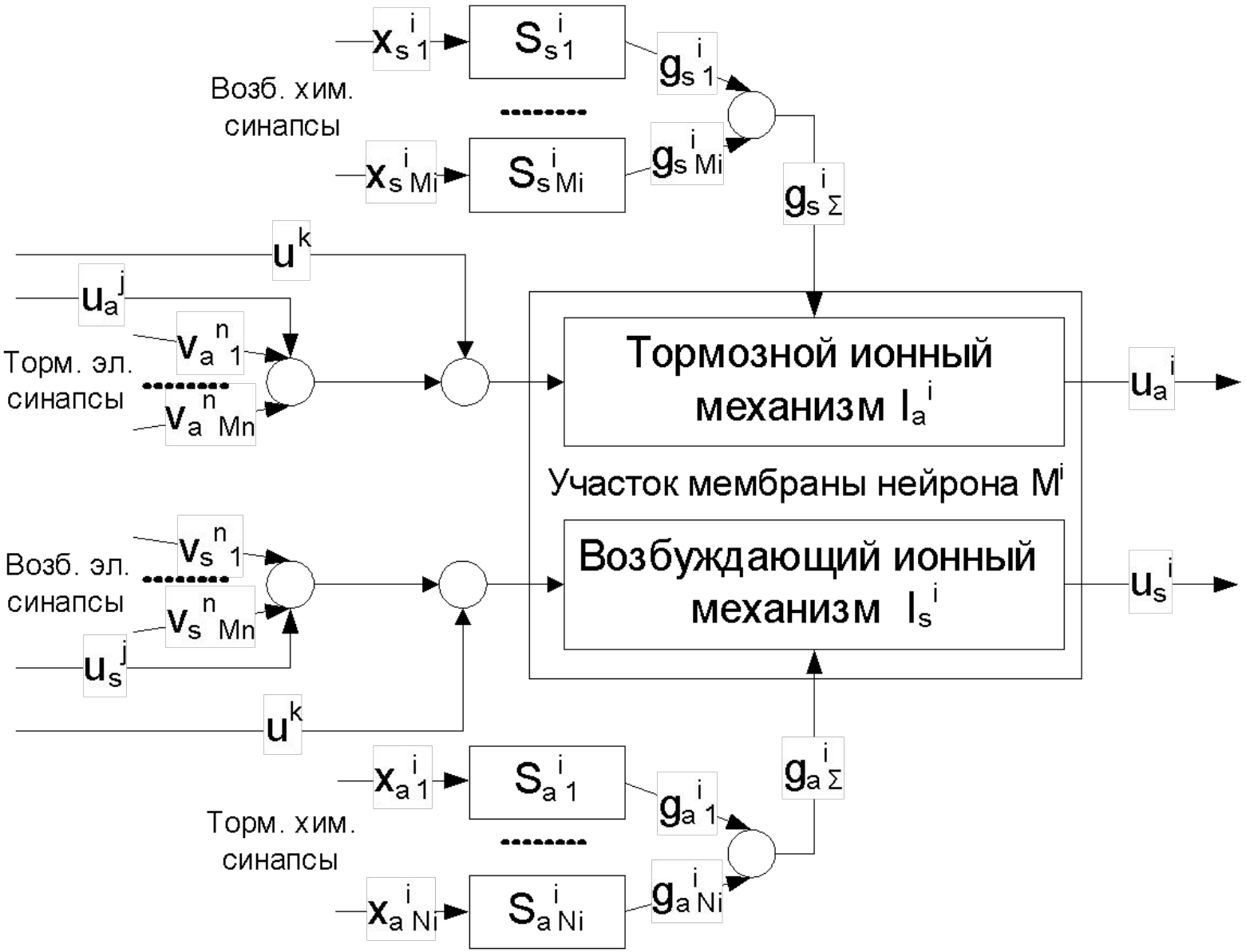


Пейсмекерные нейроны – часть 3

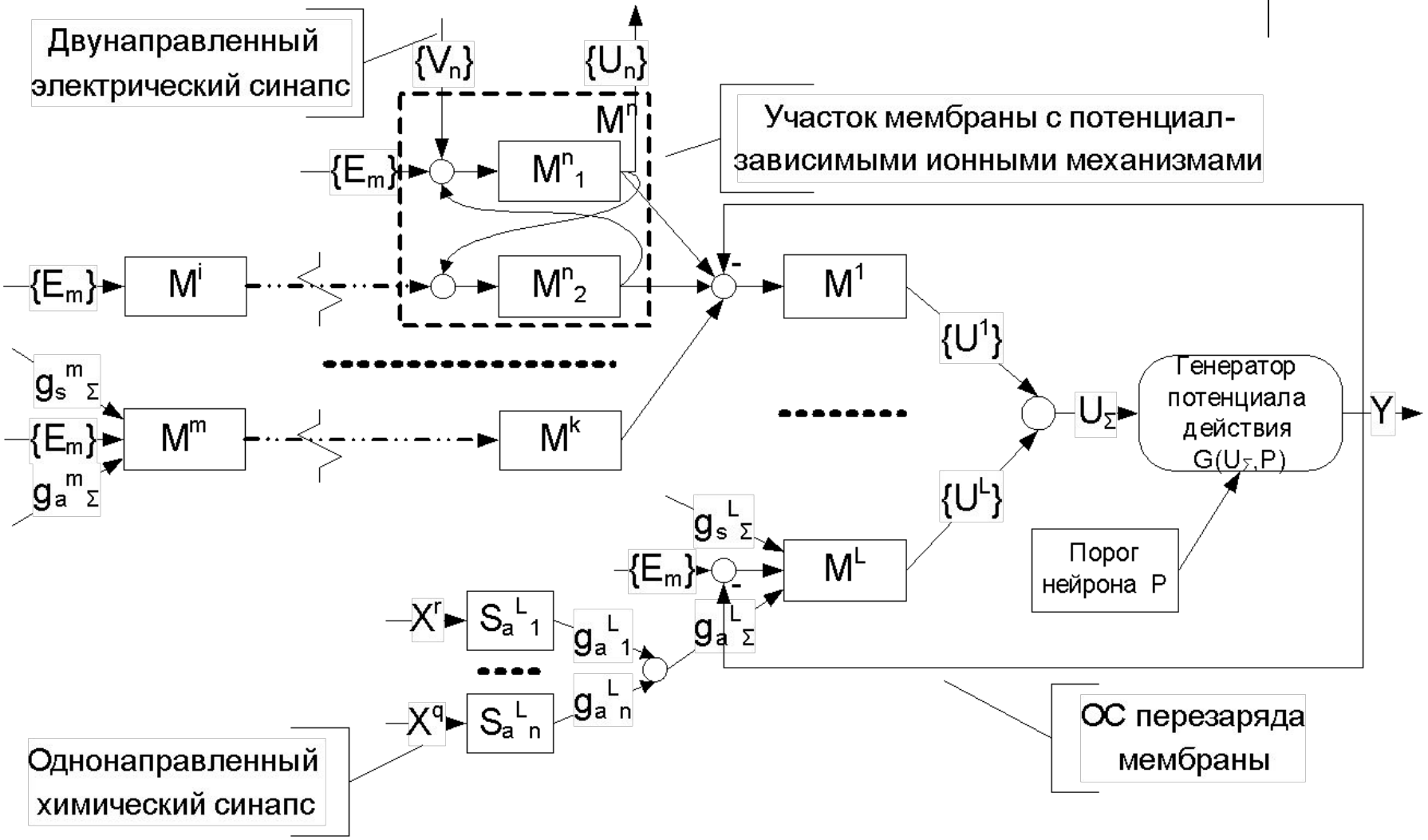


1 – частота разрядов нейрона от числа параллельных включений участков мембраны в сому
2 – частота разрядов от глубины ОС

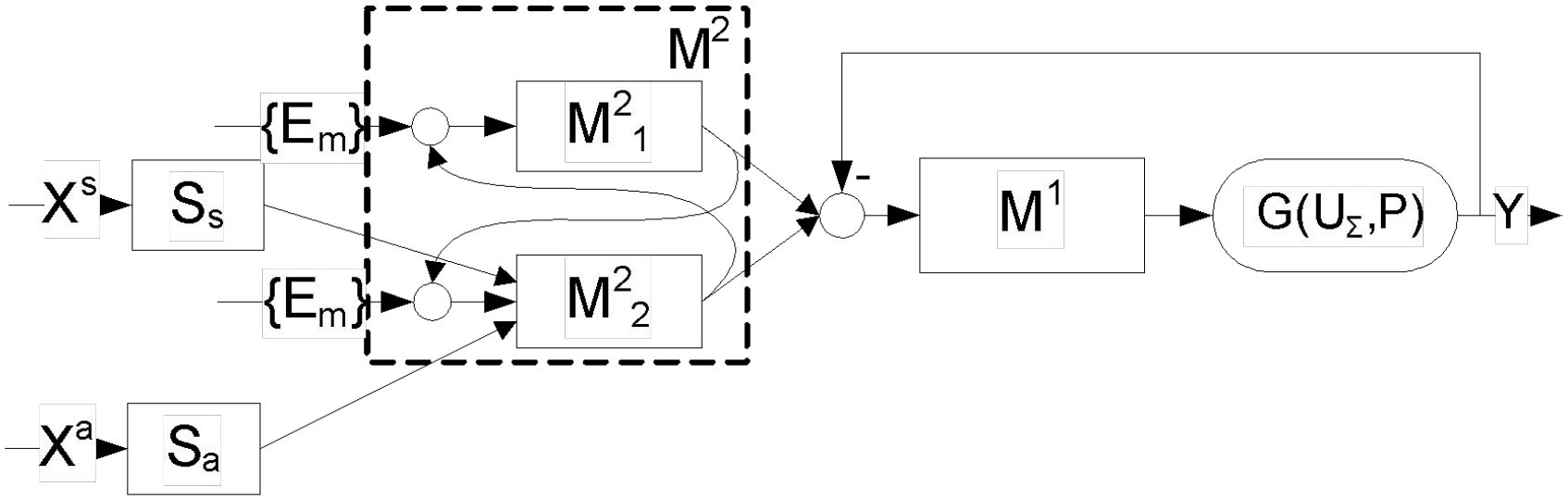
Электрический синапс



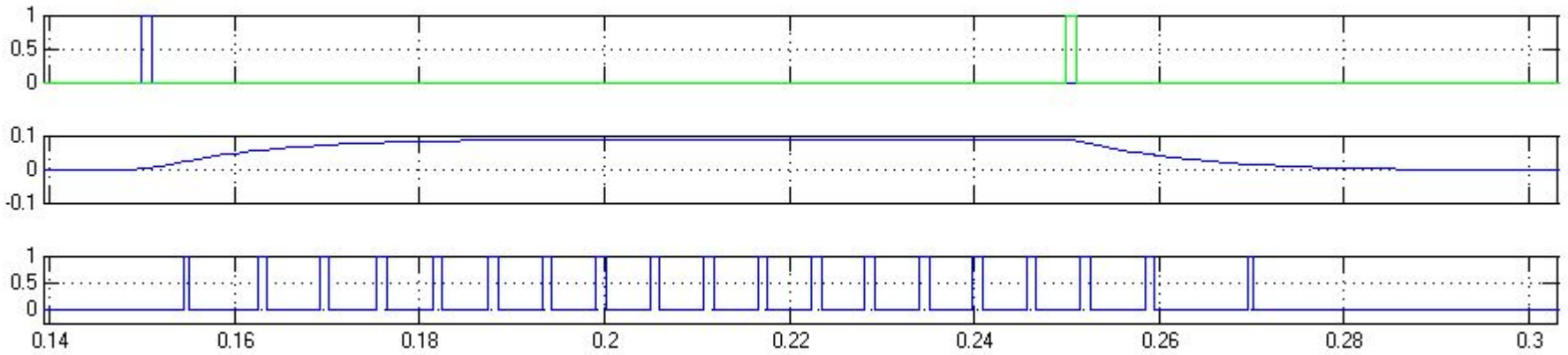
Модель нейрона – общий вид



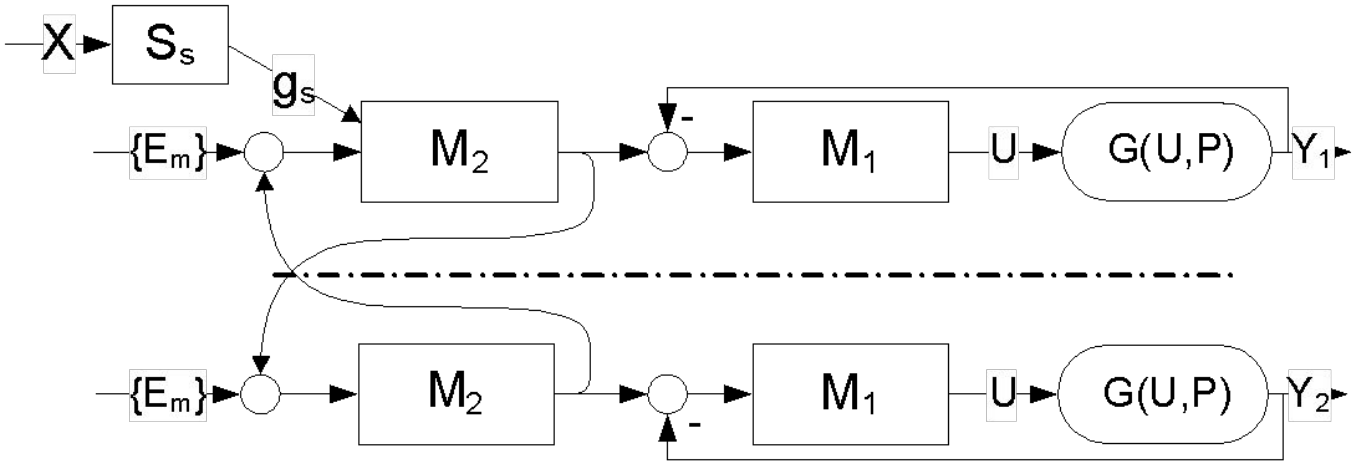
Нейрон с множеством устойчивых состояний мембранного потенциала



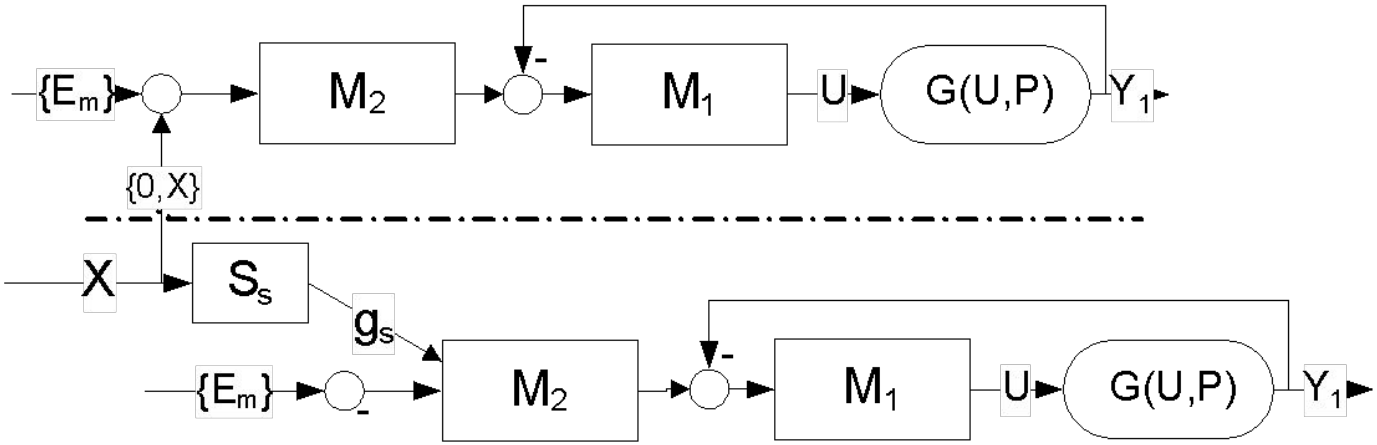
Нейрон с множеством устойчивых состояний мембранного потенциала - результаты



Взаимодействие посредством электрического синапса

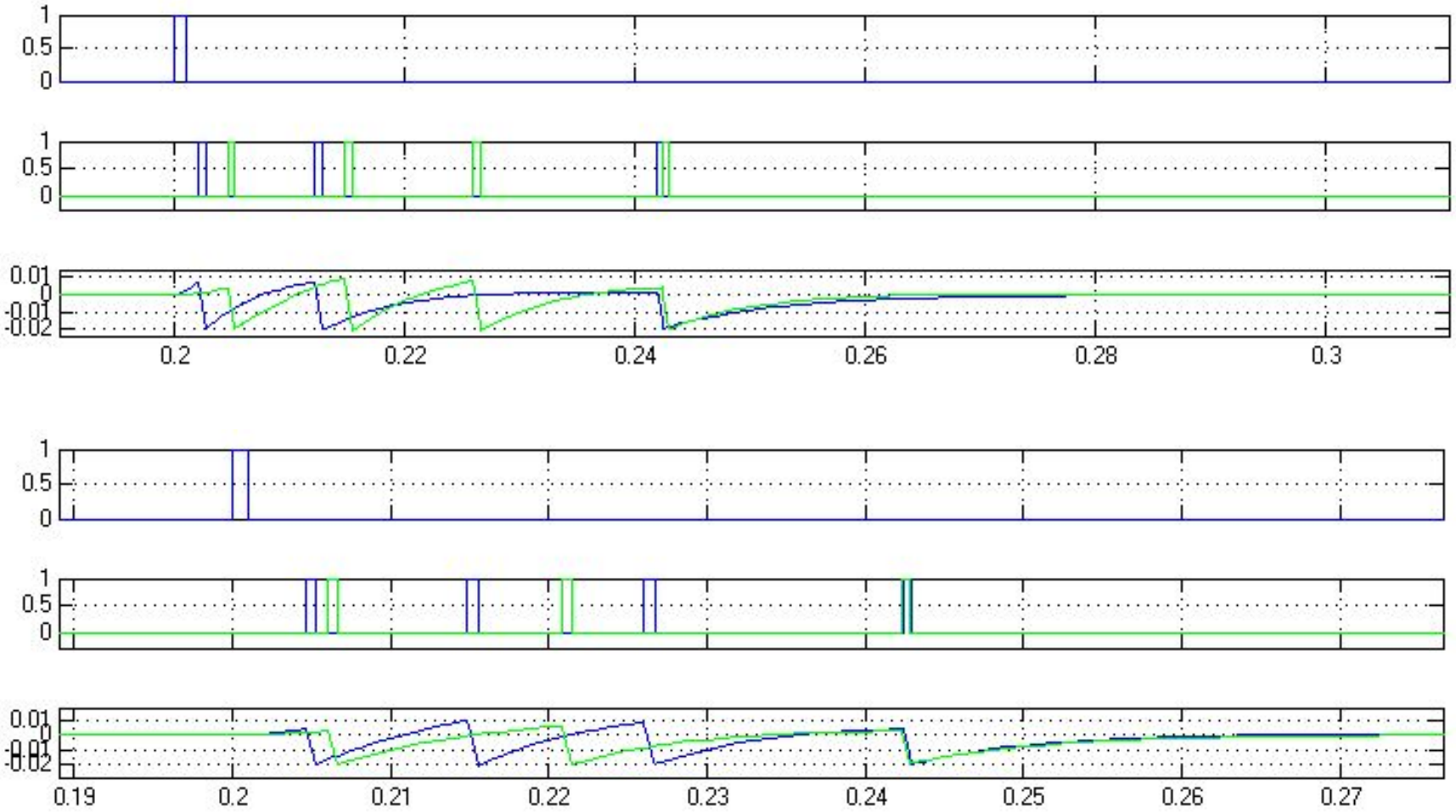


1) Дендро-дендритное взаимодействие мембран двух нейронов

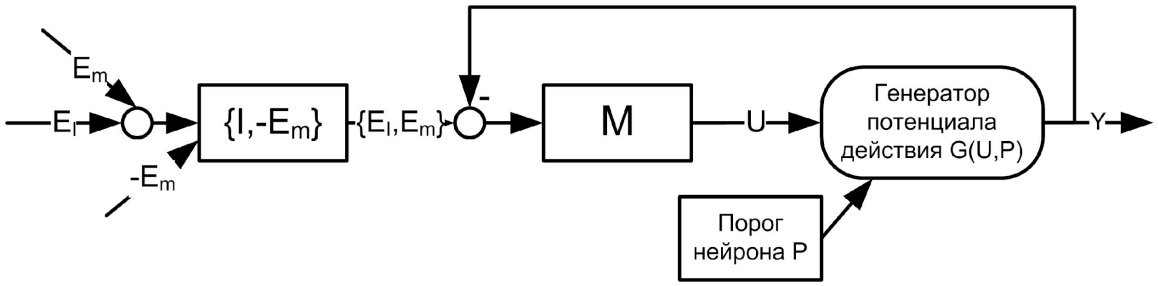


2) Сравнение реакций нейрона при активации через электрический и химический синапс

Взаимодействие посредством электрического синапса - результаты



Модель афферентного нейрона



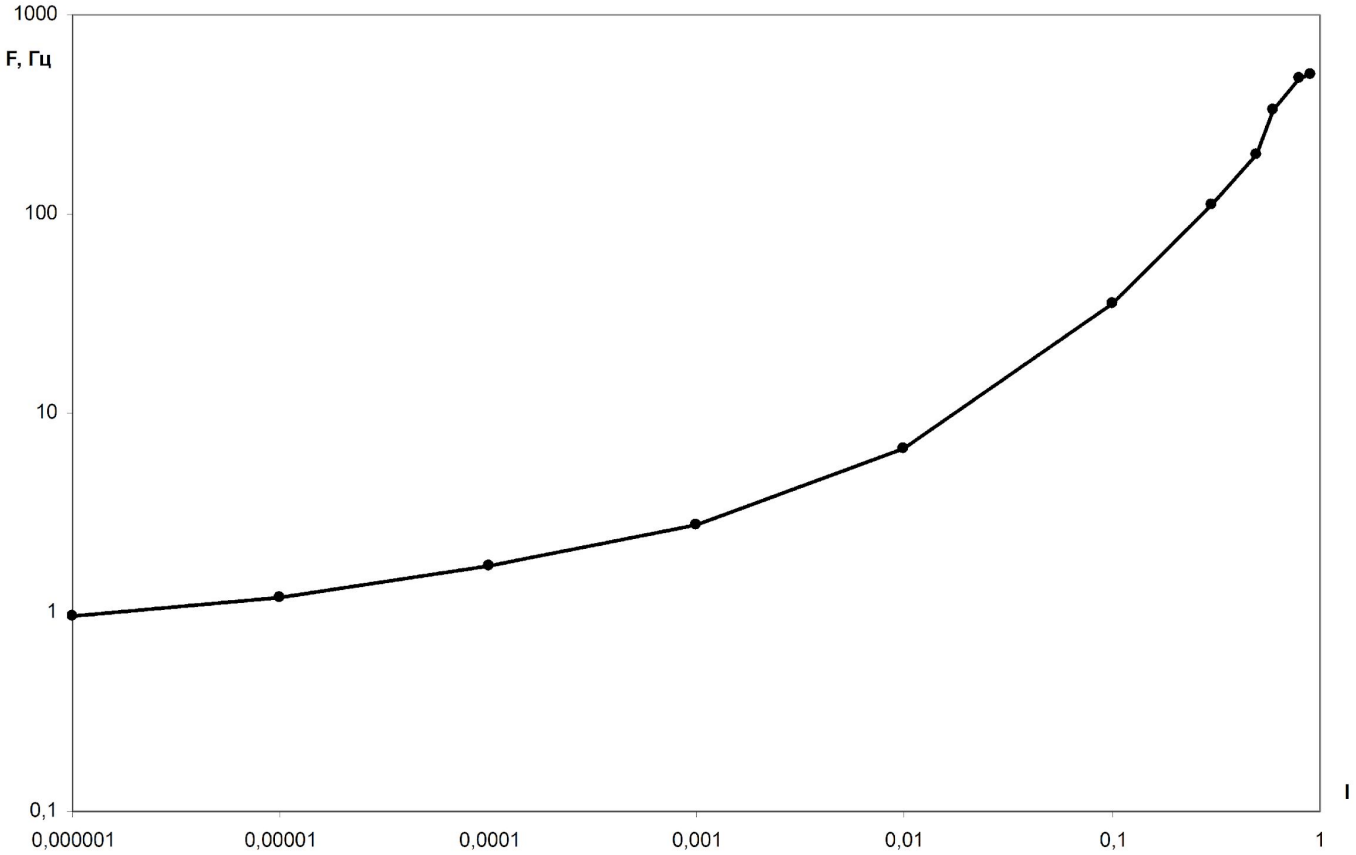
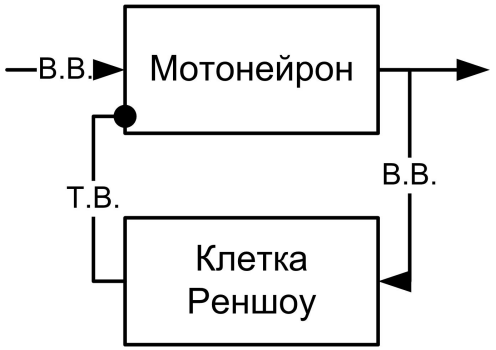
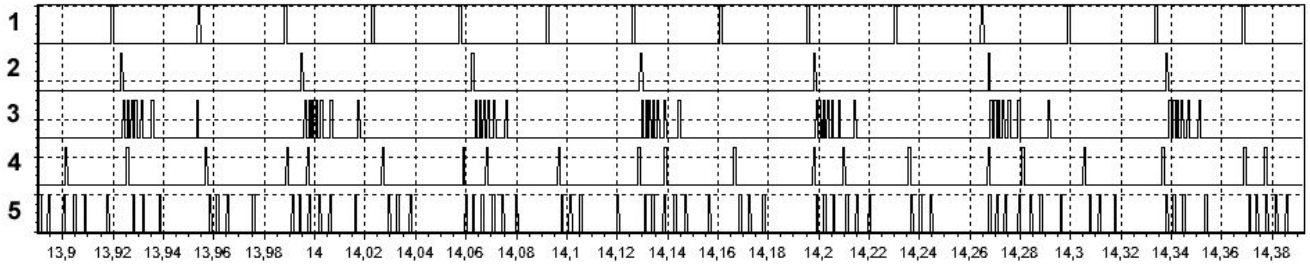


Схема возвратного торможения на примере регуляции разрядов мотонейрона

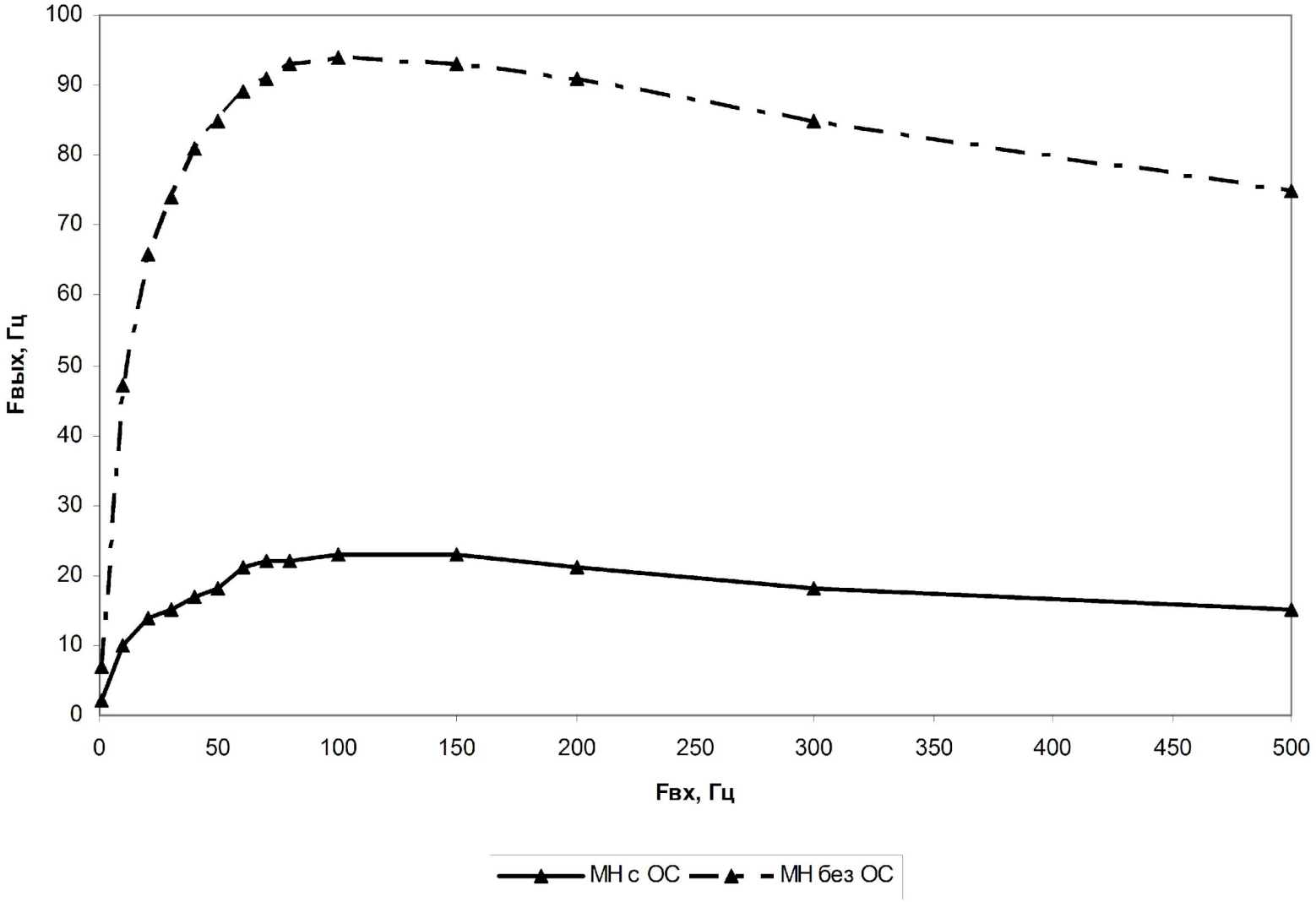
Записи импульсных потоков при исследовании взаимодействия мотонейрона и клетки Реншоу на частоте возбуждения мотонейрона 20 гц (а) и 50 гц (б).
1 – возбуждающий вход мотонейрона;
2 – разряды клетки Реншоу;
3 – импульсы на выходе мотонейрона. Вверху - отметка времени 10 мс.



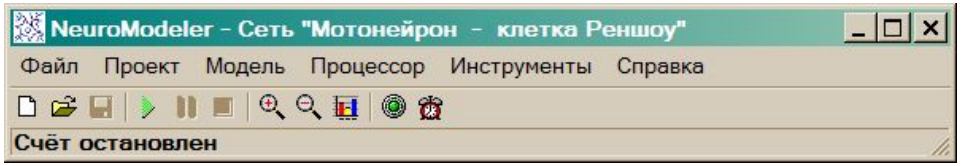


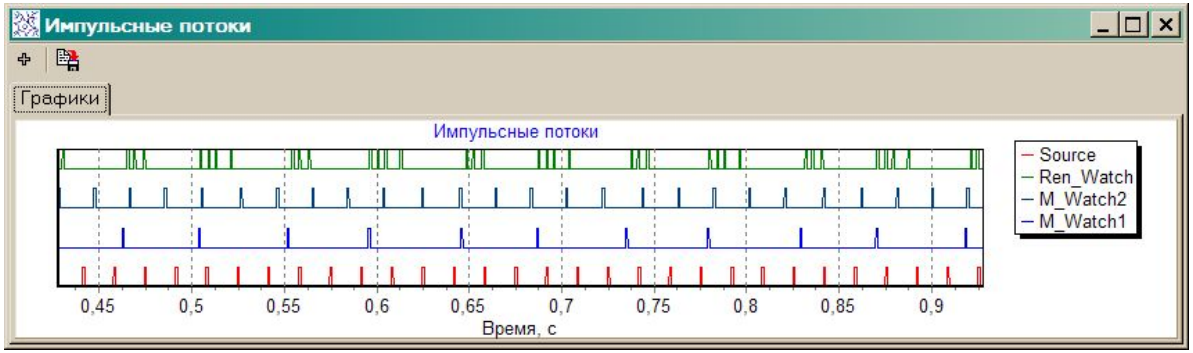
1 – Входной импульсный поток; 2 – реакции мотонейрона с включенной ОС; 3 – реакции клетки Реншоу с включенной ОС; 4 – реакции мотонейрона с разорванной ОС; 5 – реакции клетки Реншоу с разорванной ОС.

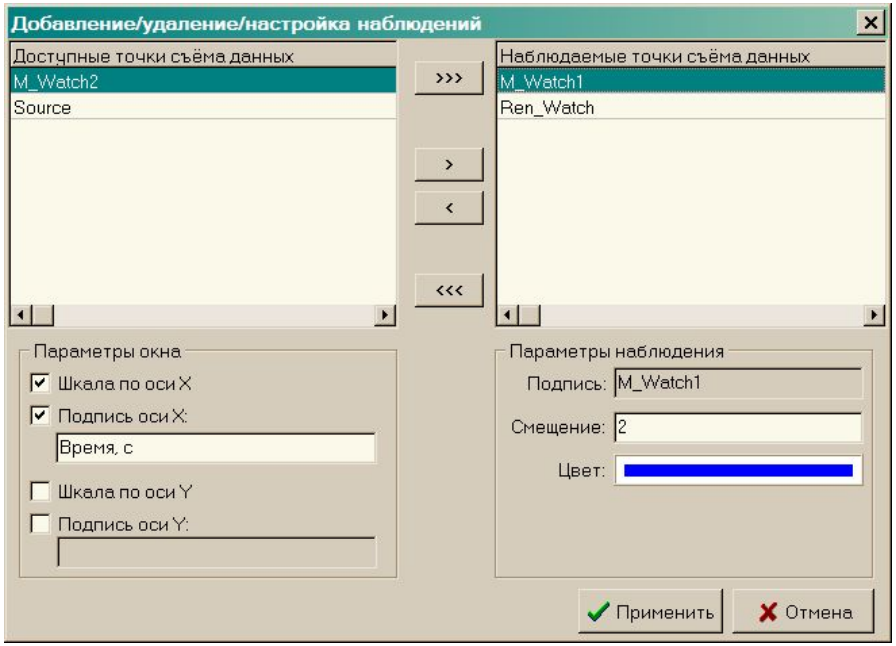
ЧЧХ мотонейрона с возвратным торможением и в его отсутствии

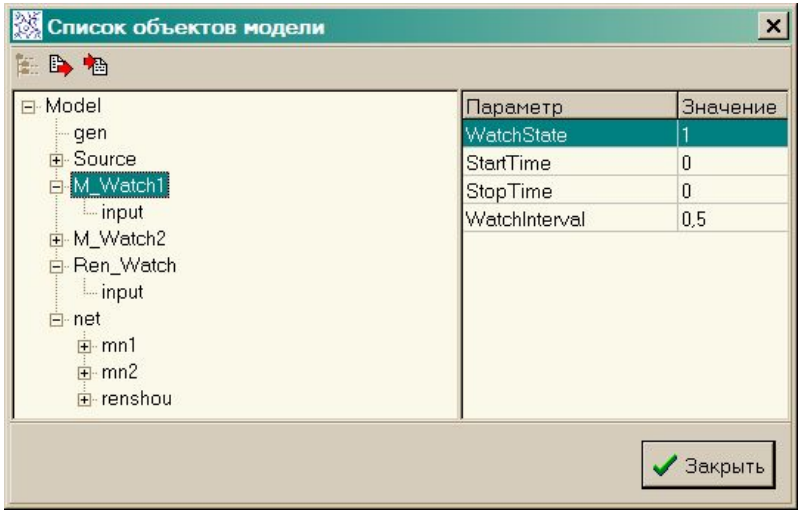


ПО NeuroModeler



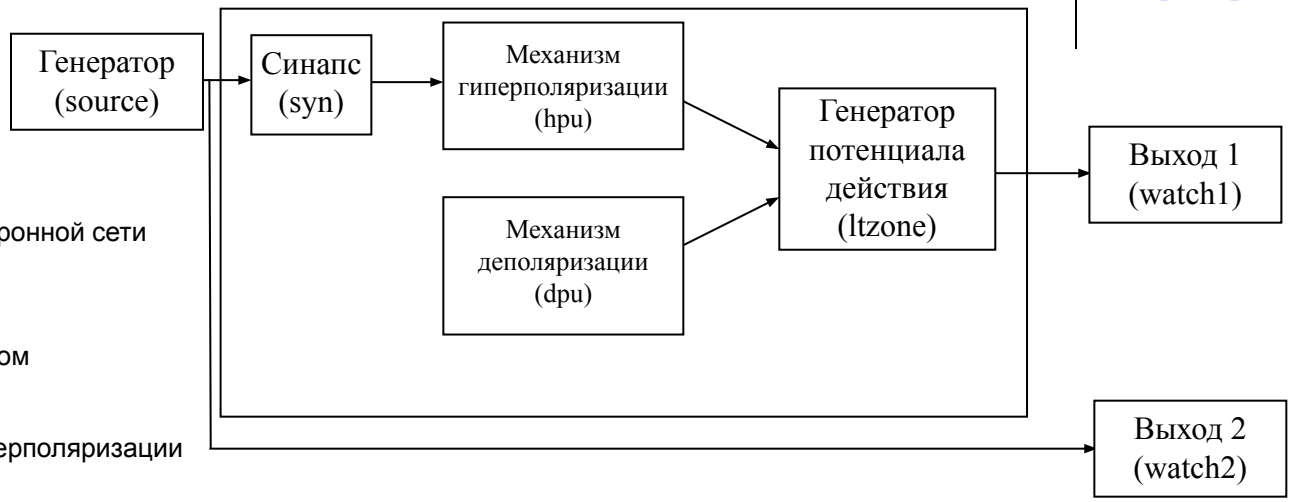




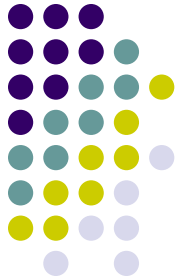


Пример описания модели сети

```
Model newmodel
{
 // Объявление источника воздействий
 Generator source
  {
   parameter Frequency=12;
  }
 // Объявление выходов модели
 PulseWatch watch1{}
 PulseWatch watch2{}
 // Объявление исследуемой нейронной сети
 Net net
  {
   //   Объявление нейрона
   // с одним возбуждающим входом
   Neuron n1
    {
     // Объявление механизма гиперполяризации
     IonUnit hpu{
       parameter MaxIntensity=-1;
       Synapse syn{} // Объявление синапса   }
     // Объявление механизма деполяризации
     IonUnit dpu{
       parameter MaxIntensity=1;
      }
     // Объявление генераторной зоны
     LTZone ltzone{}
    }
  }
 // Связь источника воздействия с входом нейрона
 link source:net.n1.hpu.syn;
 // Связь источника воздействия с выходом 2 модели
 link source:watch2.input;
 // Связь нейрона с выходом 1 модели
 link net.n1:watch1.input;
}
```



Направления дальнейших исследований



- Исследование системы управления мышечным сокращением, включающей в себя вставочные нейроны, управляющие воздействия с высших уровней и расширенную модель мышцы с управлением по напряжению волокна и по длине.
- Создание модели многозвенного манипулятора с независимыми приводами в шарнирах и разработка системы управления на моделях естественных нейронов.
- Включение в разработанную систему управления модель системы зрения и разработка контура управления «глаз-рука».
- Выработка принципов построения нейронной иерархичной системы управления объектами, с последовательным наращиванием функциональности такой системы от уровня к уровню.