

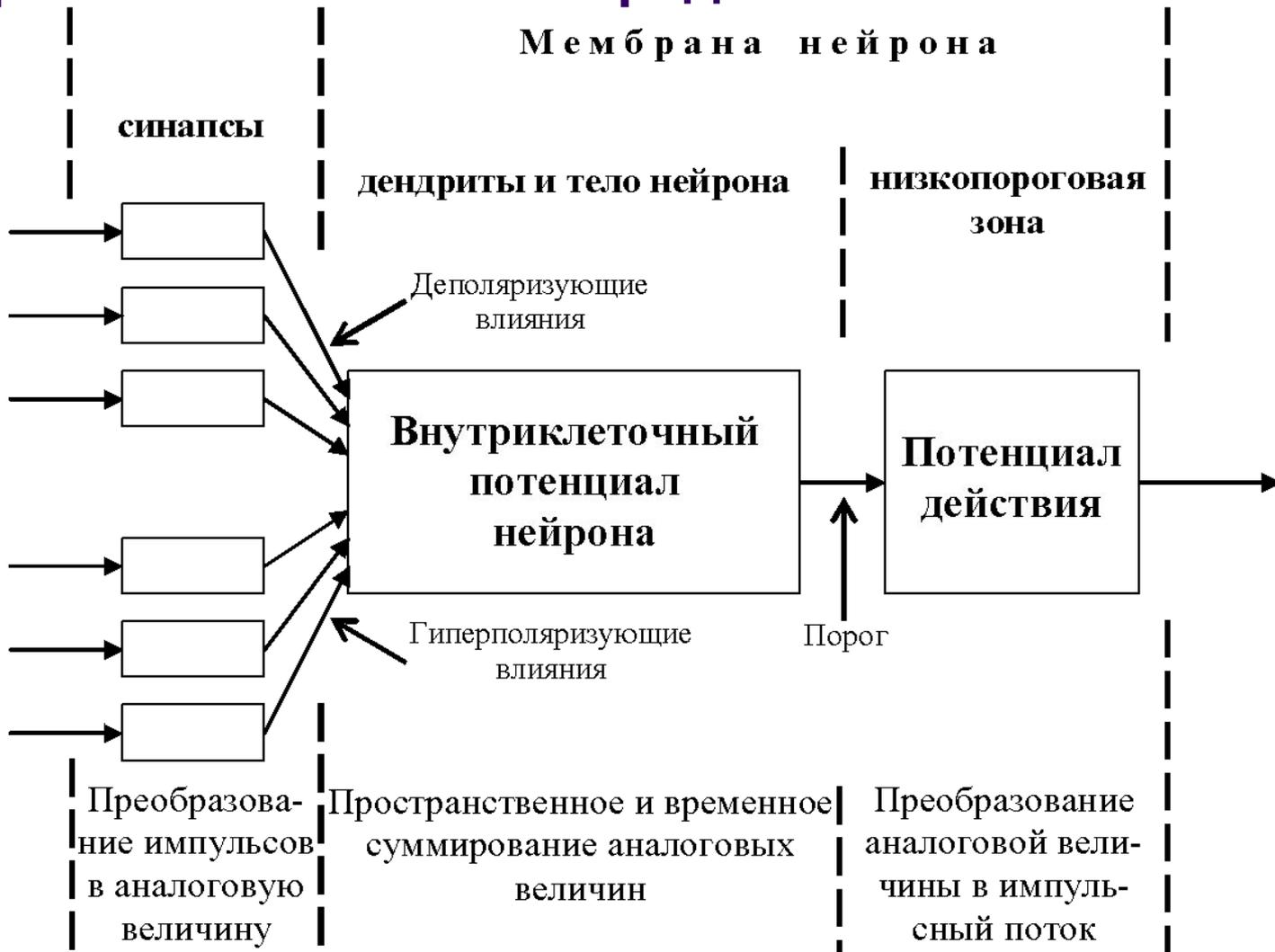


# Моделирование естественного нейрона, как системы преобразования импульсных потоков

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

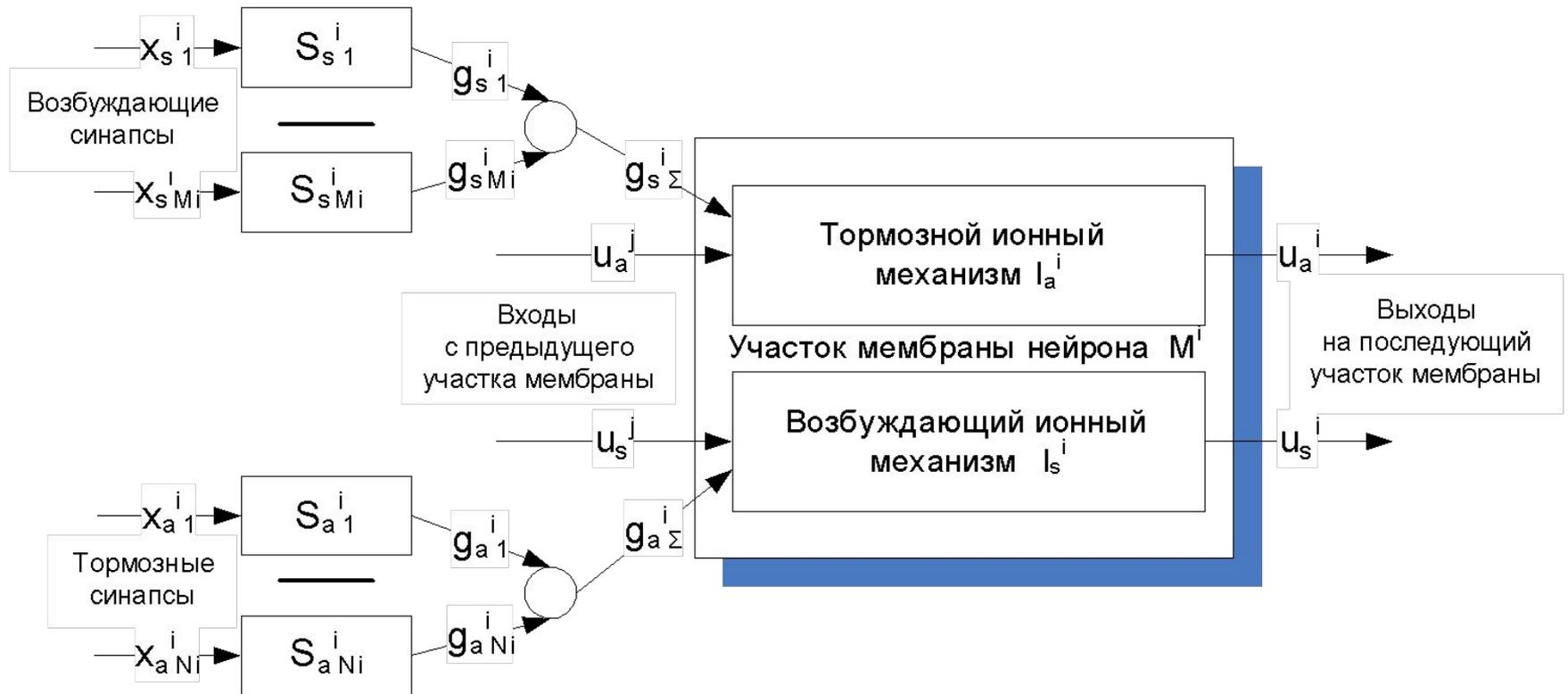
# Функциональная схема основных процессов преобразования импульсных потоков в нейроне с химической передачей



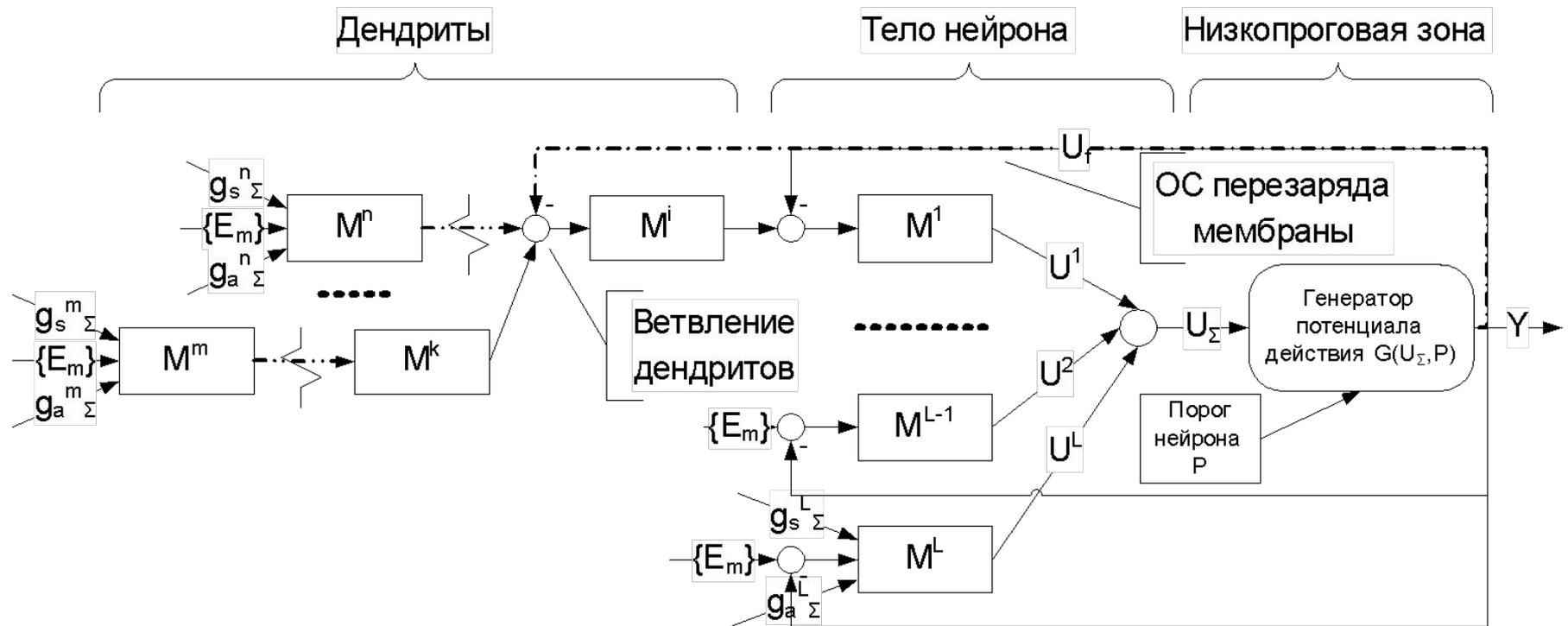
# Функциональная схема модели нейрона



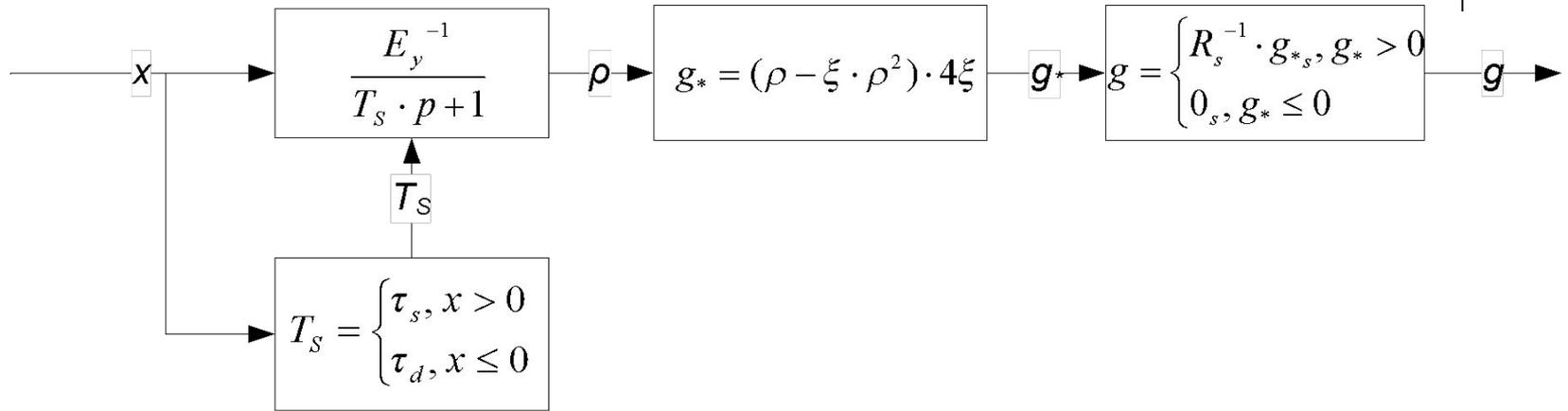
# Функциональная схема модели $i$ -го участка мембраны нейрона $M_i$



# Организация структуры мембраны нейрона



# Модель синапса с химической передачей



$\tau_s$  - постоянная времени выделения медиатора,

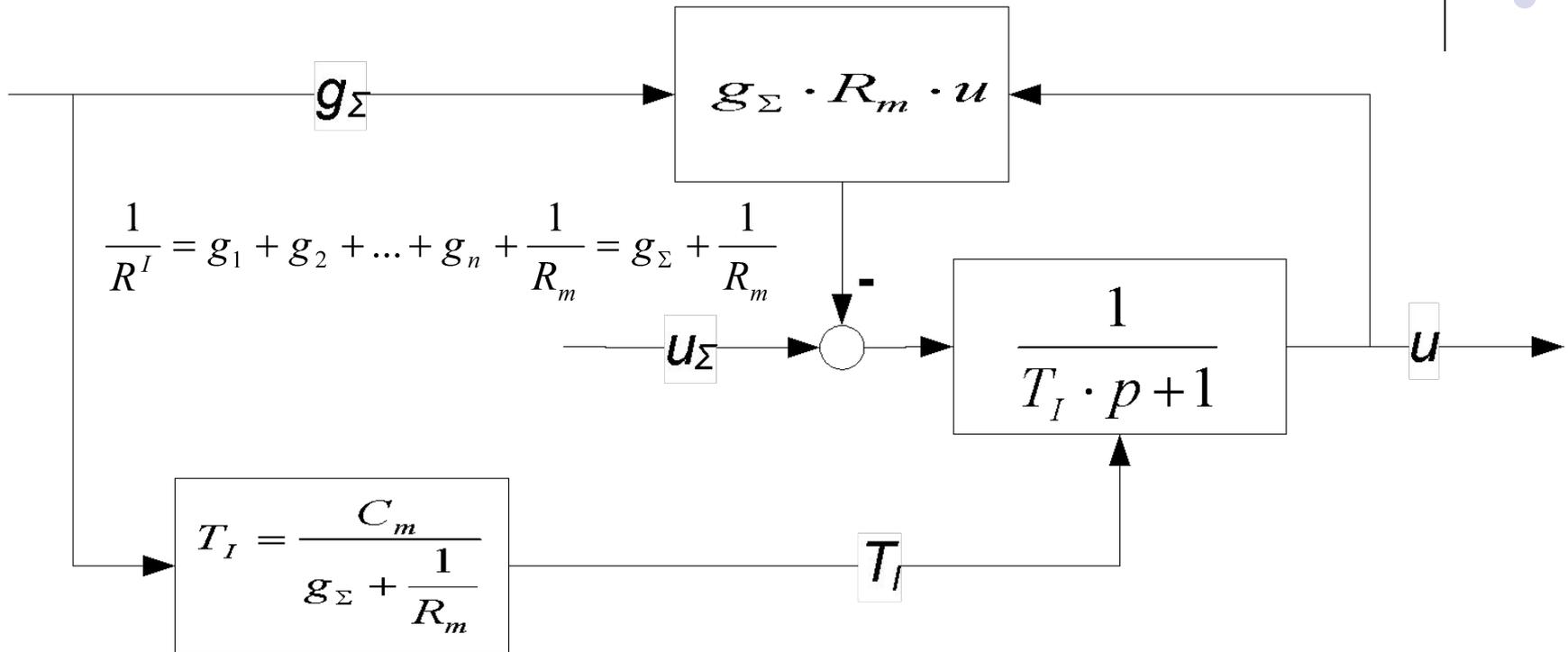
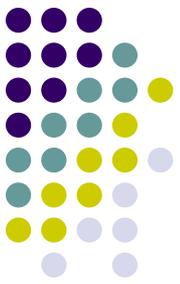
$\tau_d$  - постоянная времени распада медиатора,

$\xi$  - 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



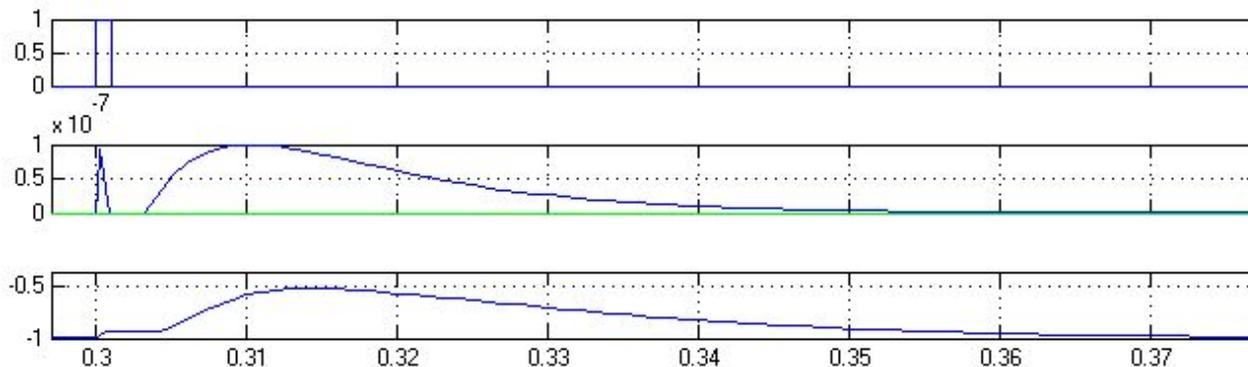
$g_\Sigma$  - суммарная эффективность влияния синапсов на ионный механизм,

$R_m > 0$  - сопротивление мембраны,

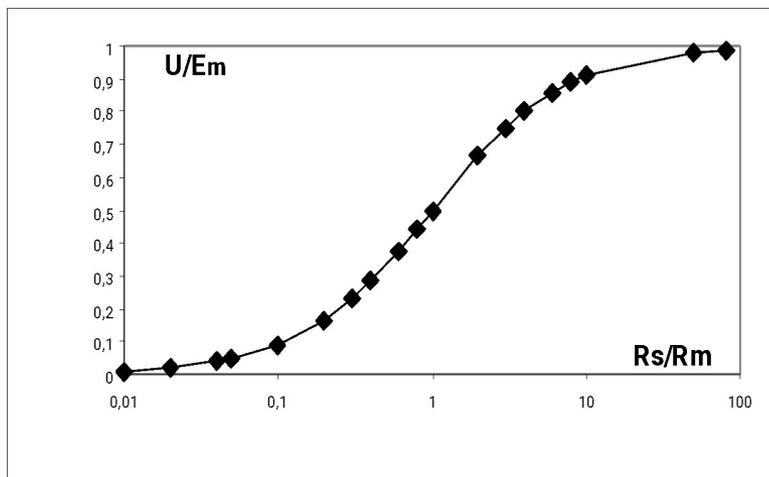
$C_m > 0$  - емкость мембраны,

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

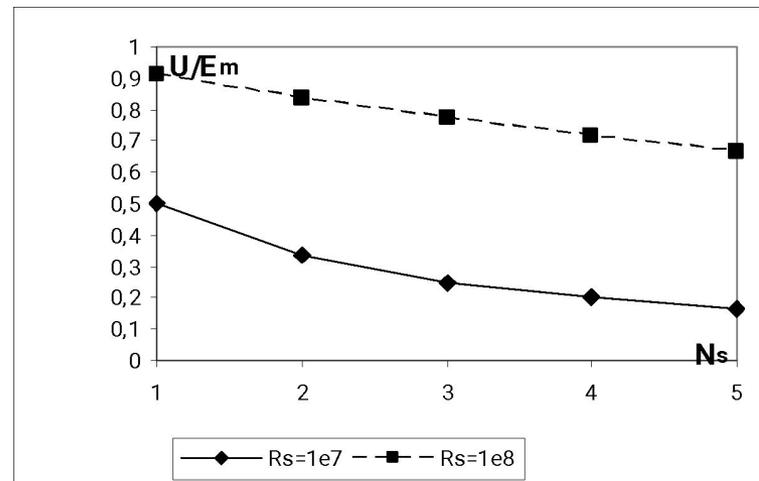
# Эффективность синаптической передачи



Влияние синапса на мембрану во времени

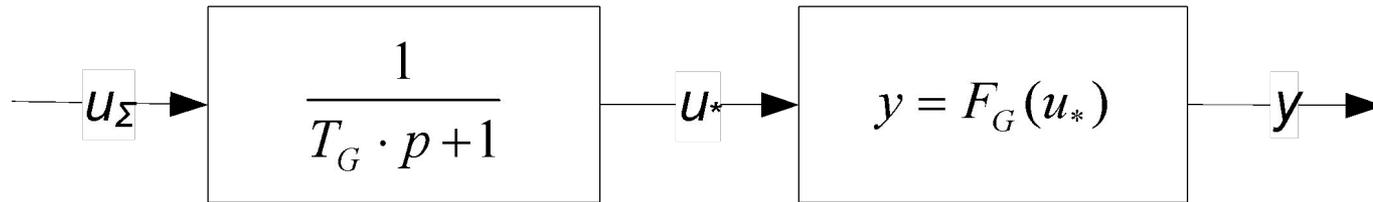


Зависимость эффективности от отношения сопротивлений



Зависимость эффективности от числа синапсов

# Генератор потенциала действия

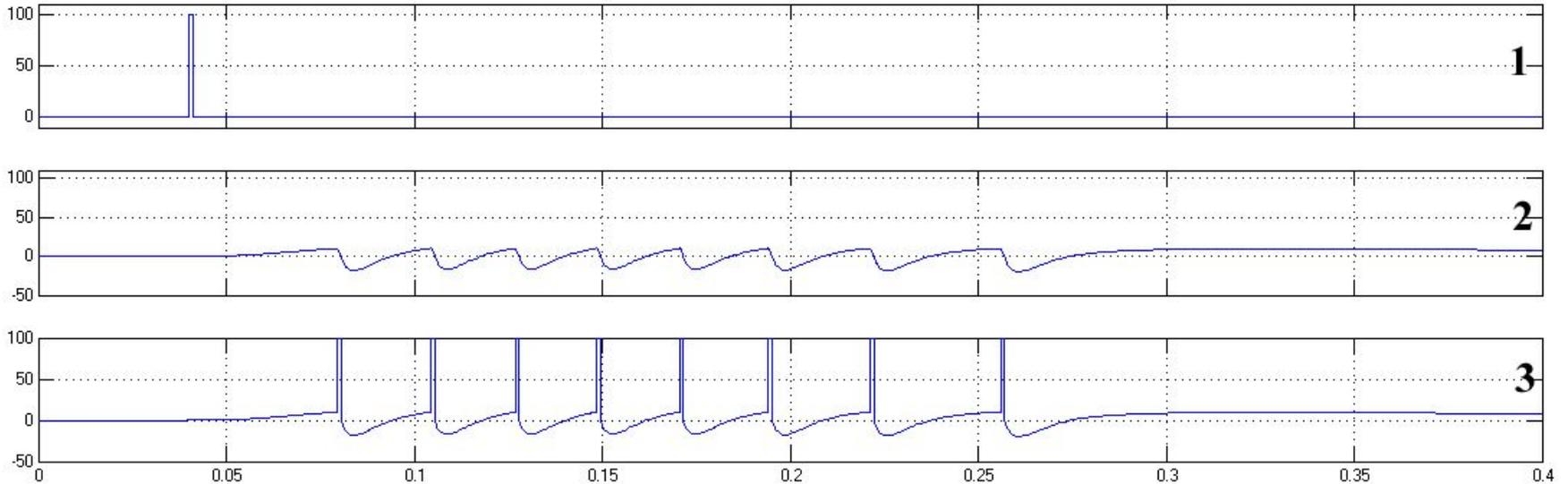


$P > 0$  – порог нейрона;

$T_G$  – 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

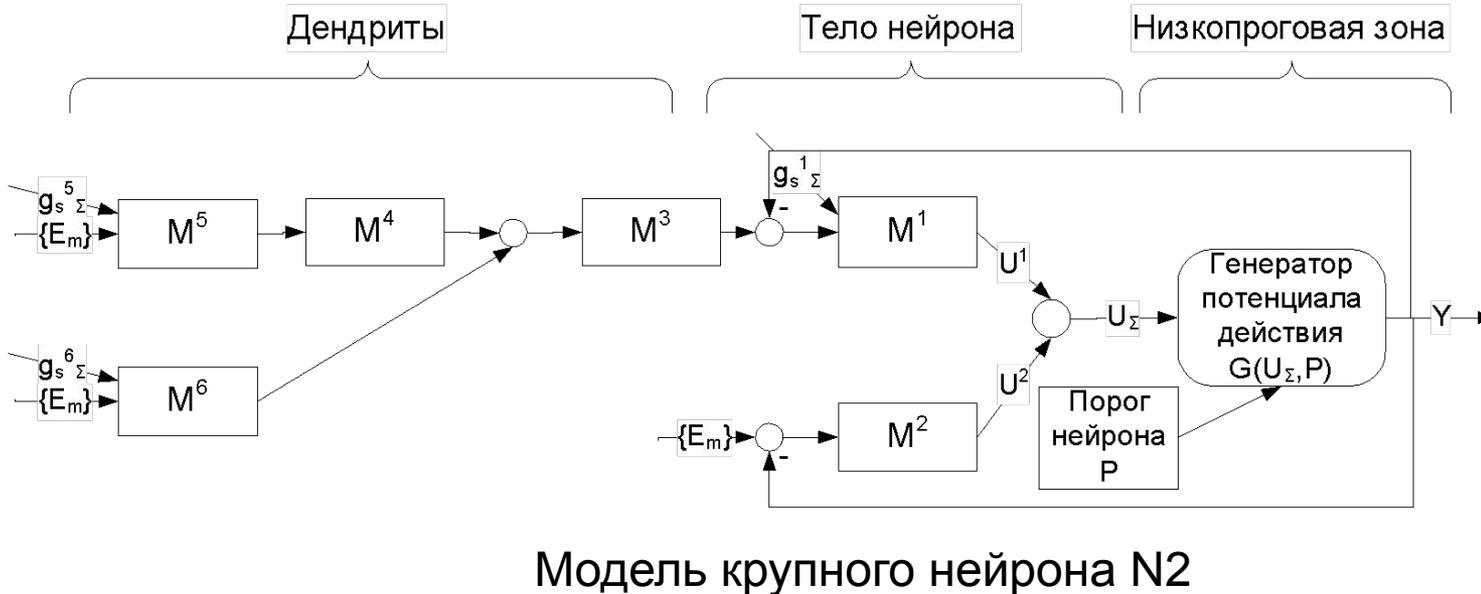
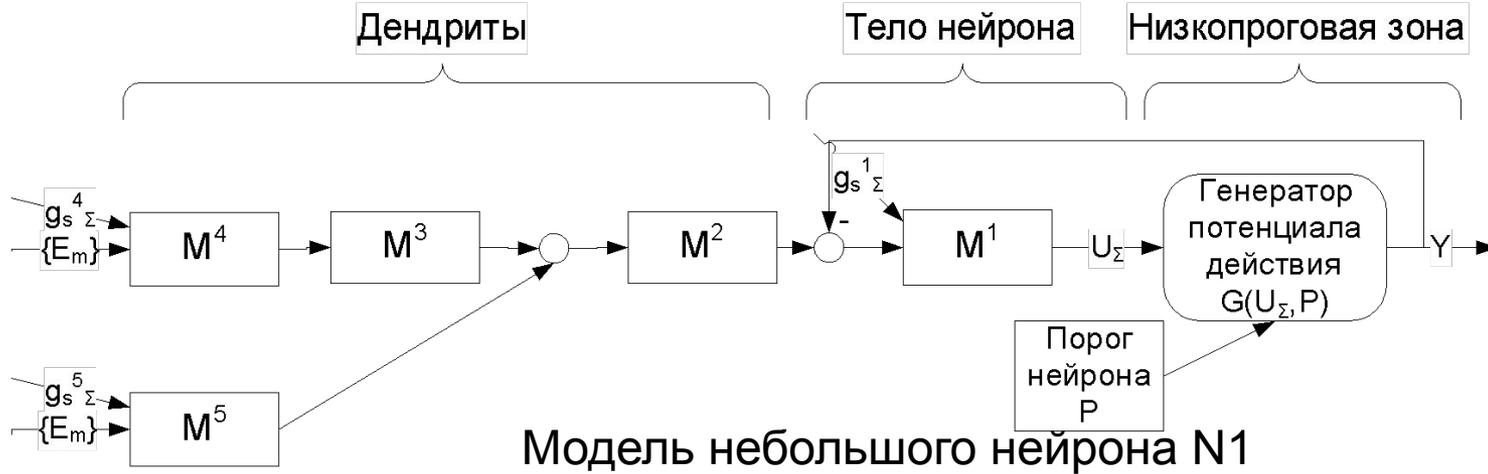


1 – возбуждающее воздействие

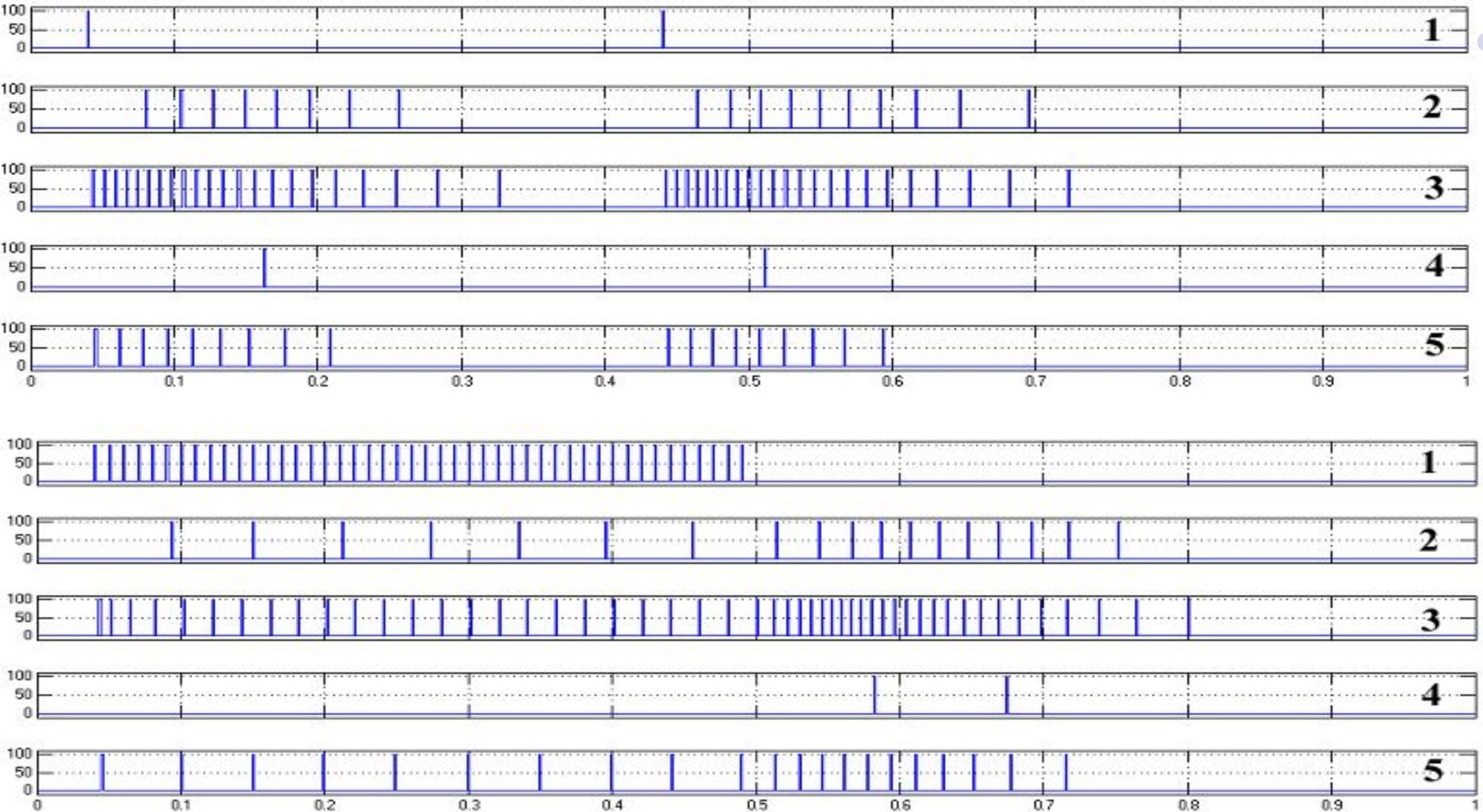
2 – внутриклеточный потенциал мембраны на генераторе потенциала действия

3 – ответы нейрона совмещенные с графиком внутриклеточного потенциала

# Модели небольшого и крупного нейронов

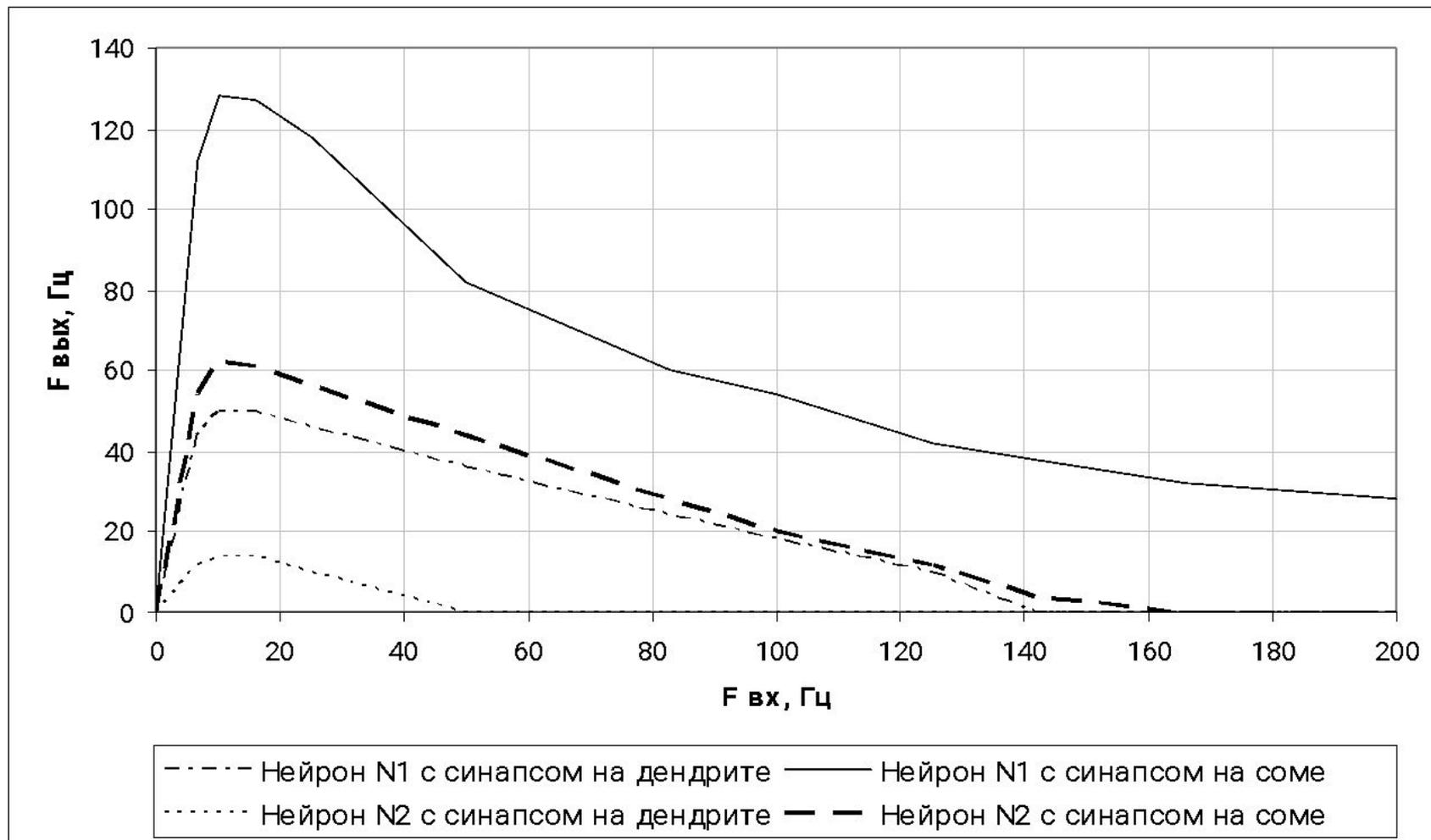


# Реакции моделей нейронов

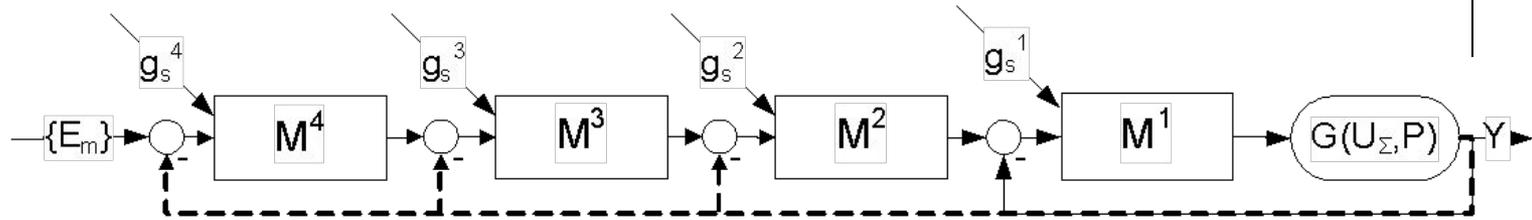


Реакции небольшого N1 (2, 3) и крупного N2 (4, 5) нейронов с синапсами на дендрите (2, 4) и соме (3, 5) в ответ на входное воздействие (1) частотой 2.5 и 100 Гц

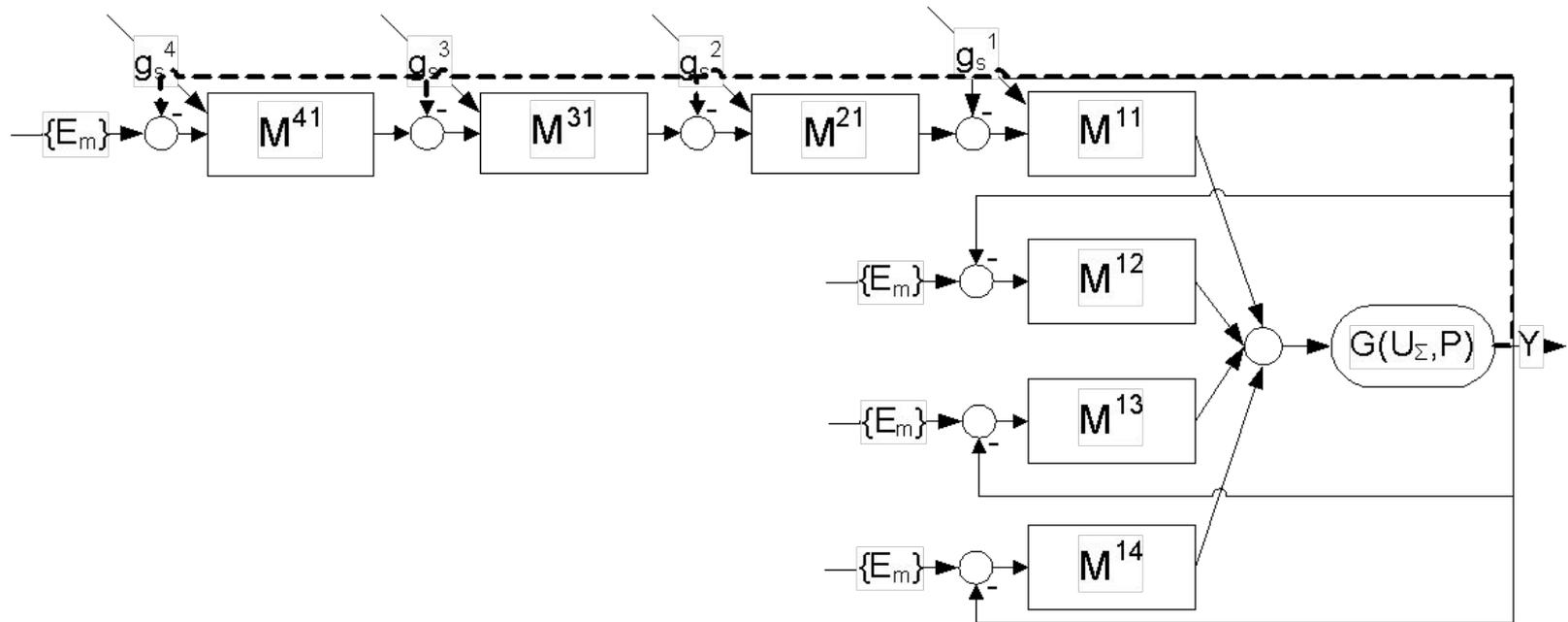
# Зависимость частоты ответов модели нейрона от частоты входной последовательности



# Модели нейронов различных размеров

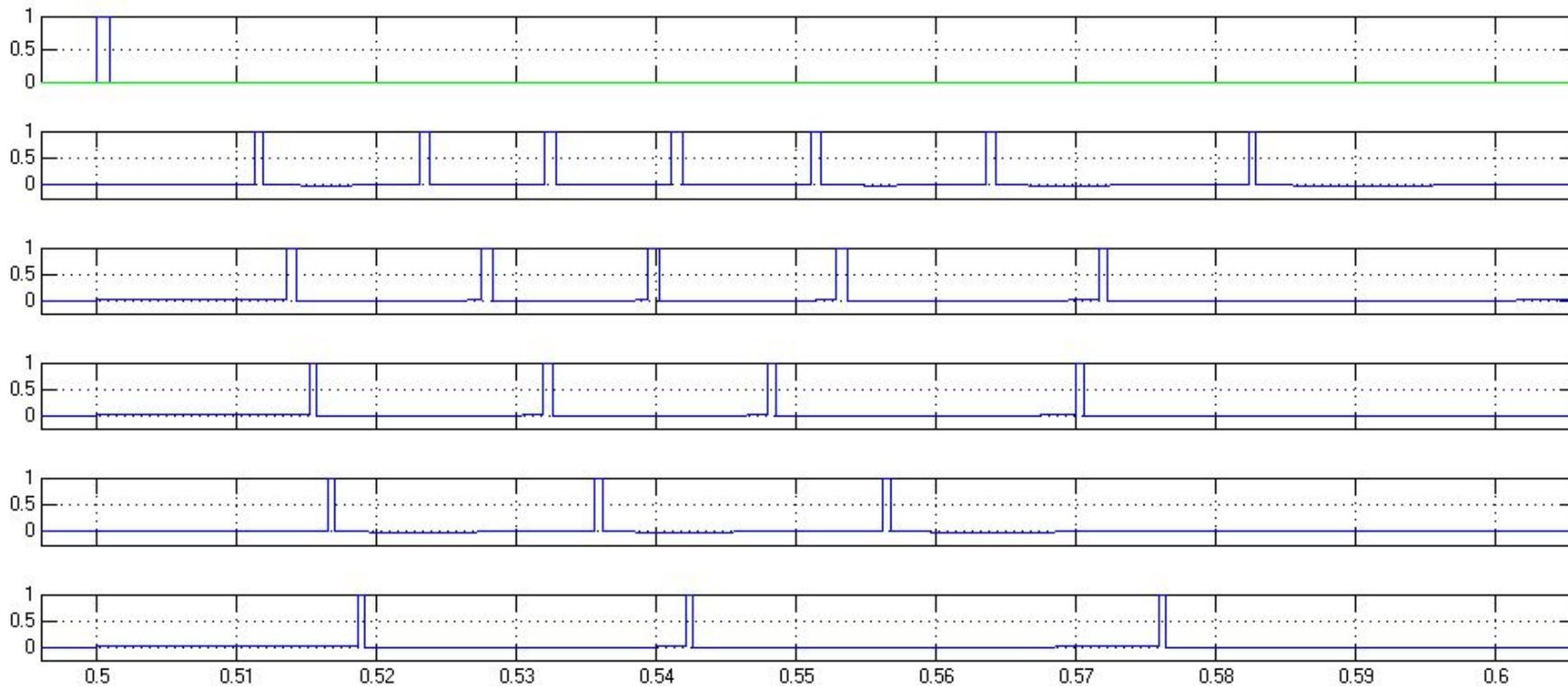


$N_3$  - Малый (пейсмекерный) нейрон

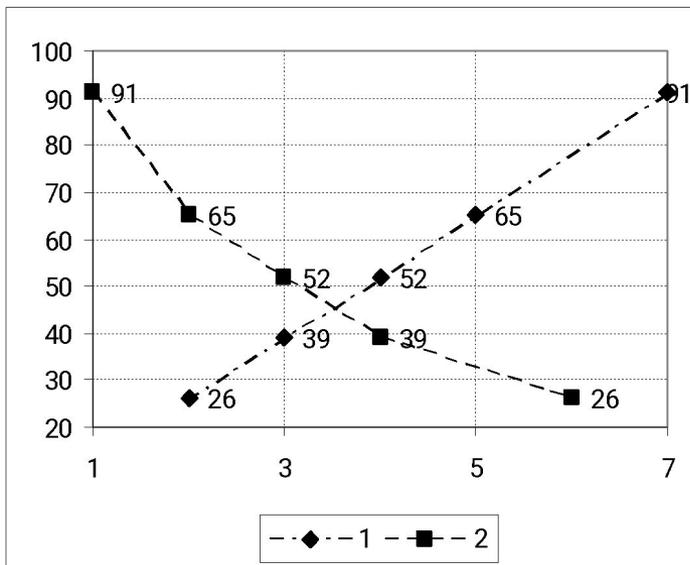


$N_4$  - Крупный (пейсмекерный) нейрон

# Реакции моделей нейронов различного размера

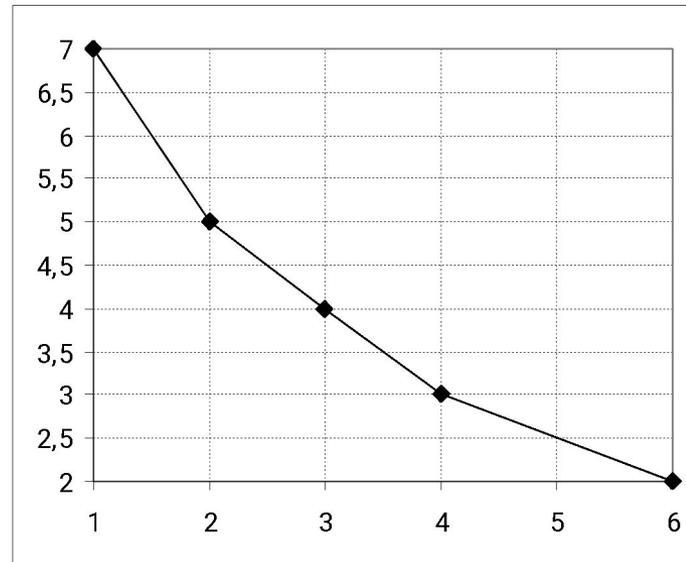


# Частота разрядов нейрона в зависимости от размера



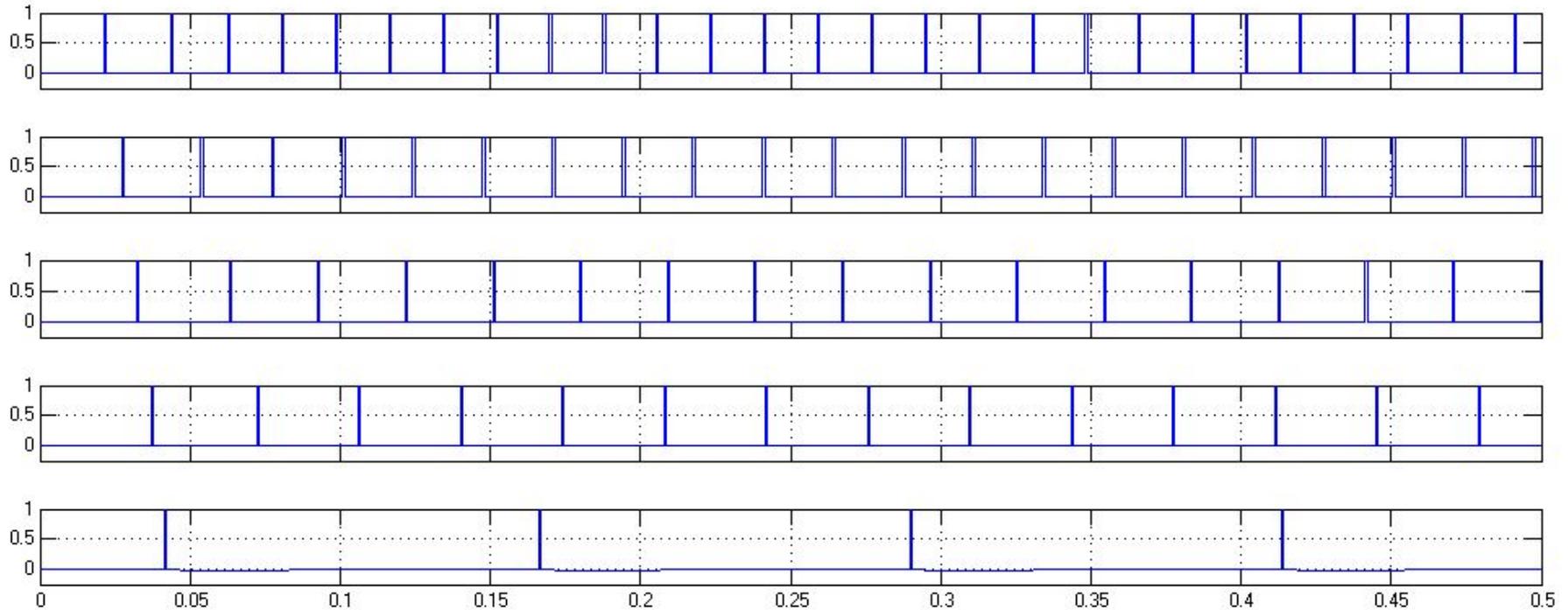
1 – зависимость средней частоты от числа импульсов в пачке

2 – зависимость средней частоты от числа участков сомы

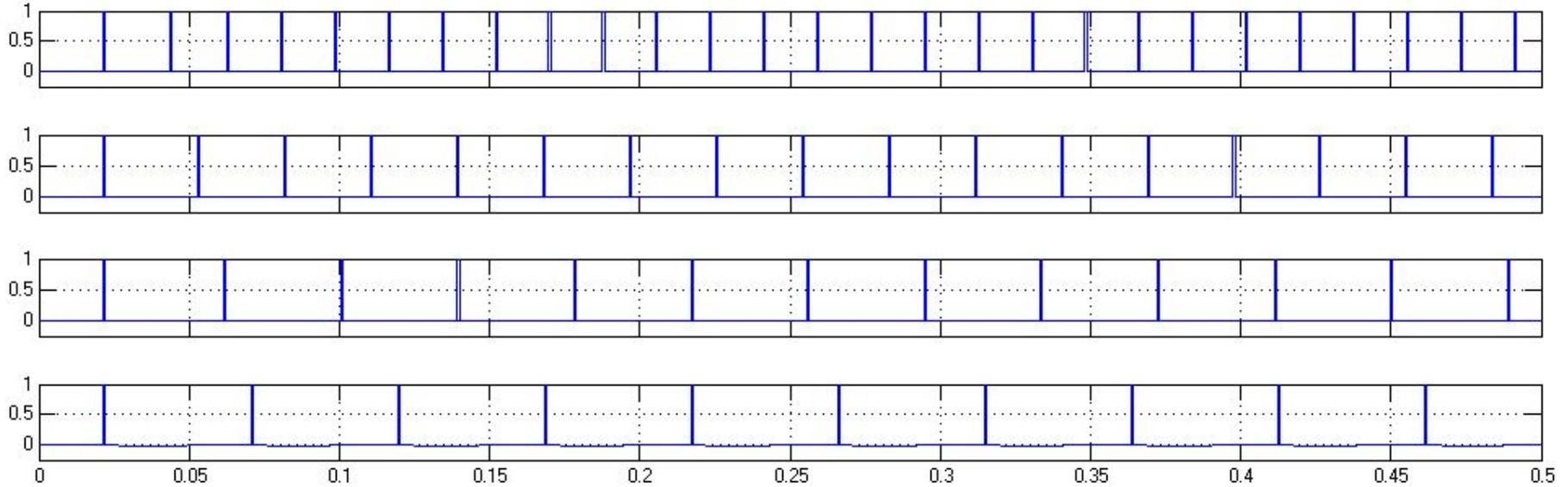


Зависимость числа импульсов в пачке от числа участков сомы

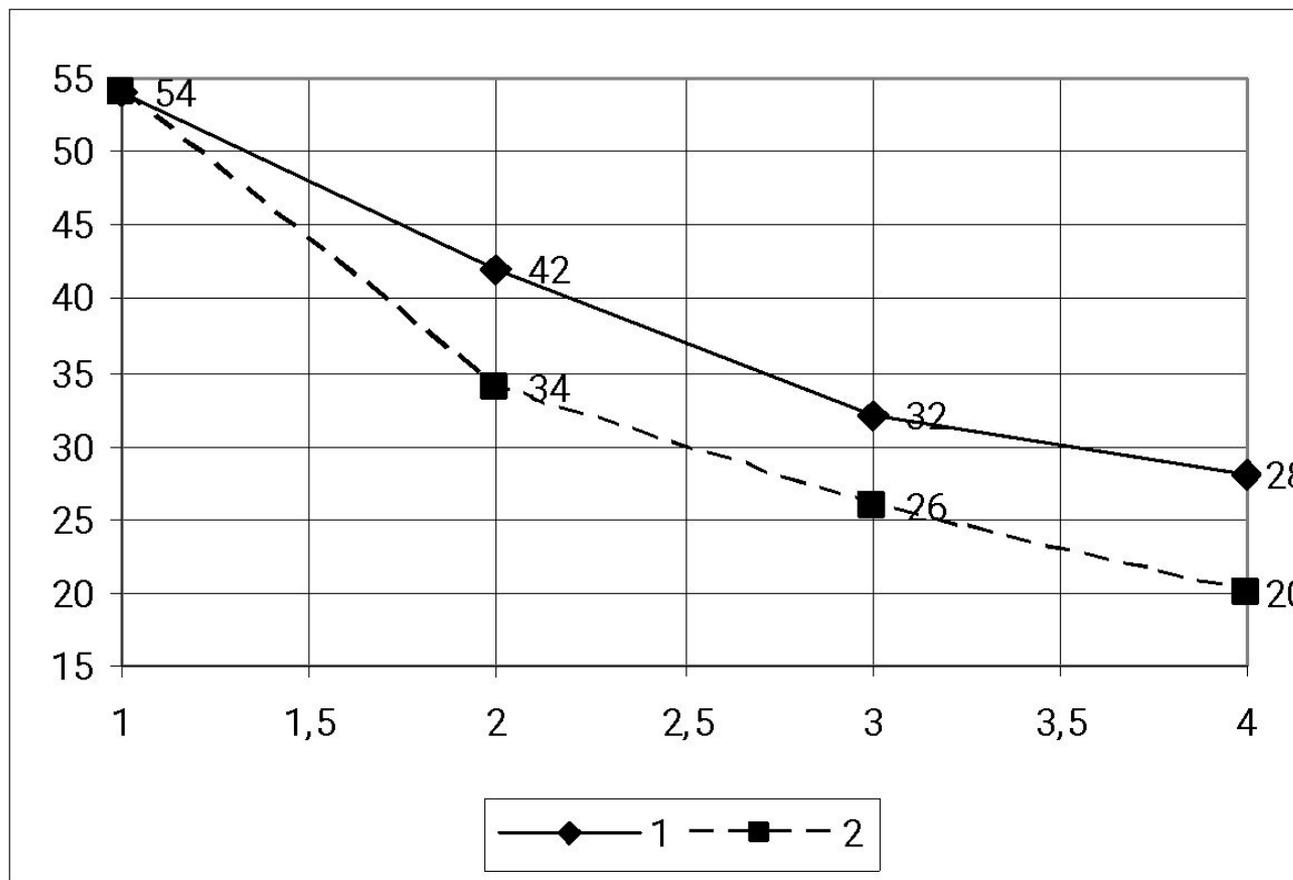
# Пейсмекерные нейроны – часть 1



# Пейсмекерные нейроны – часть 2

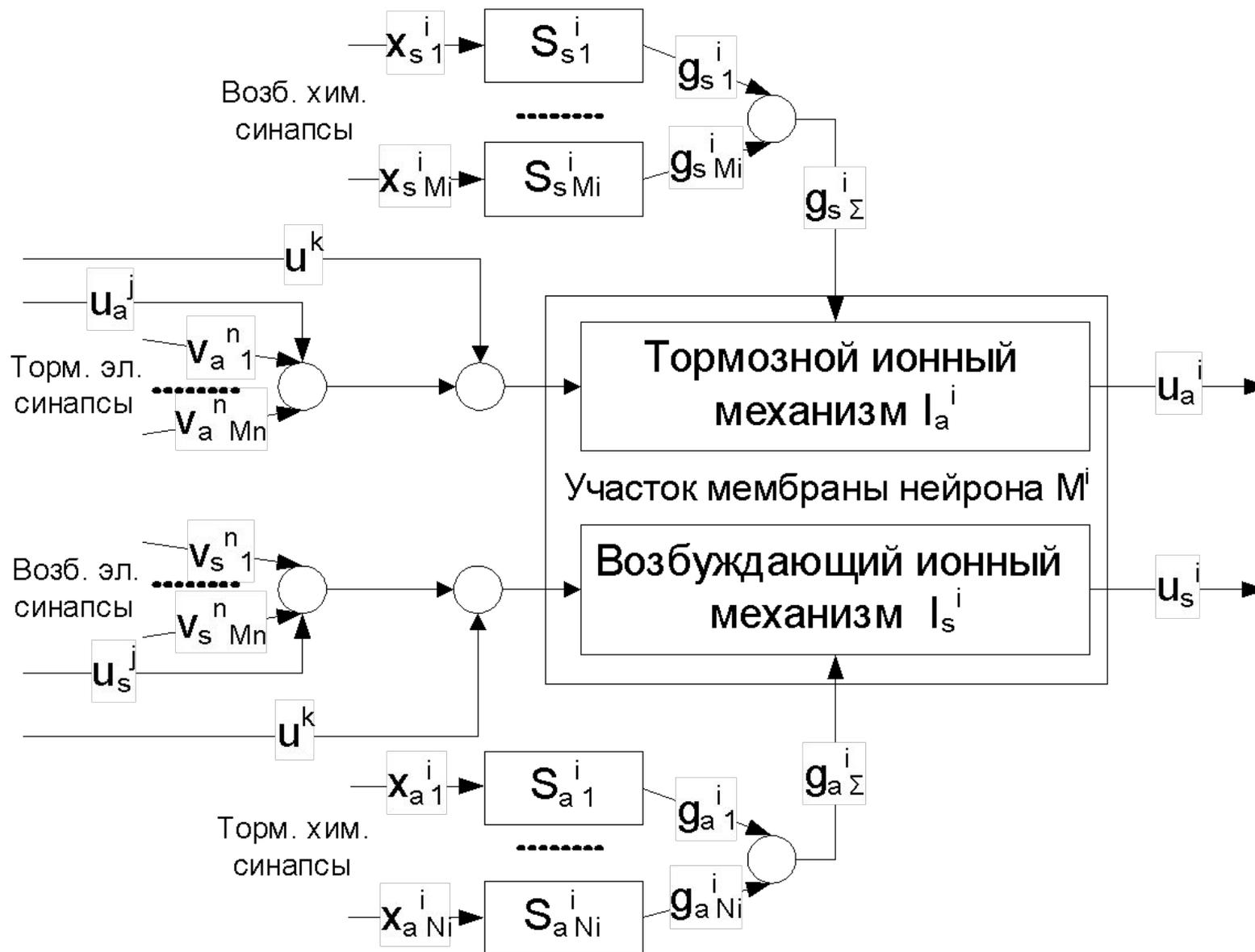


# Пейсмекерные нейроны – часть 3

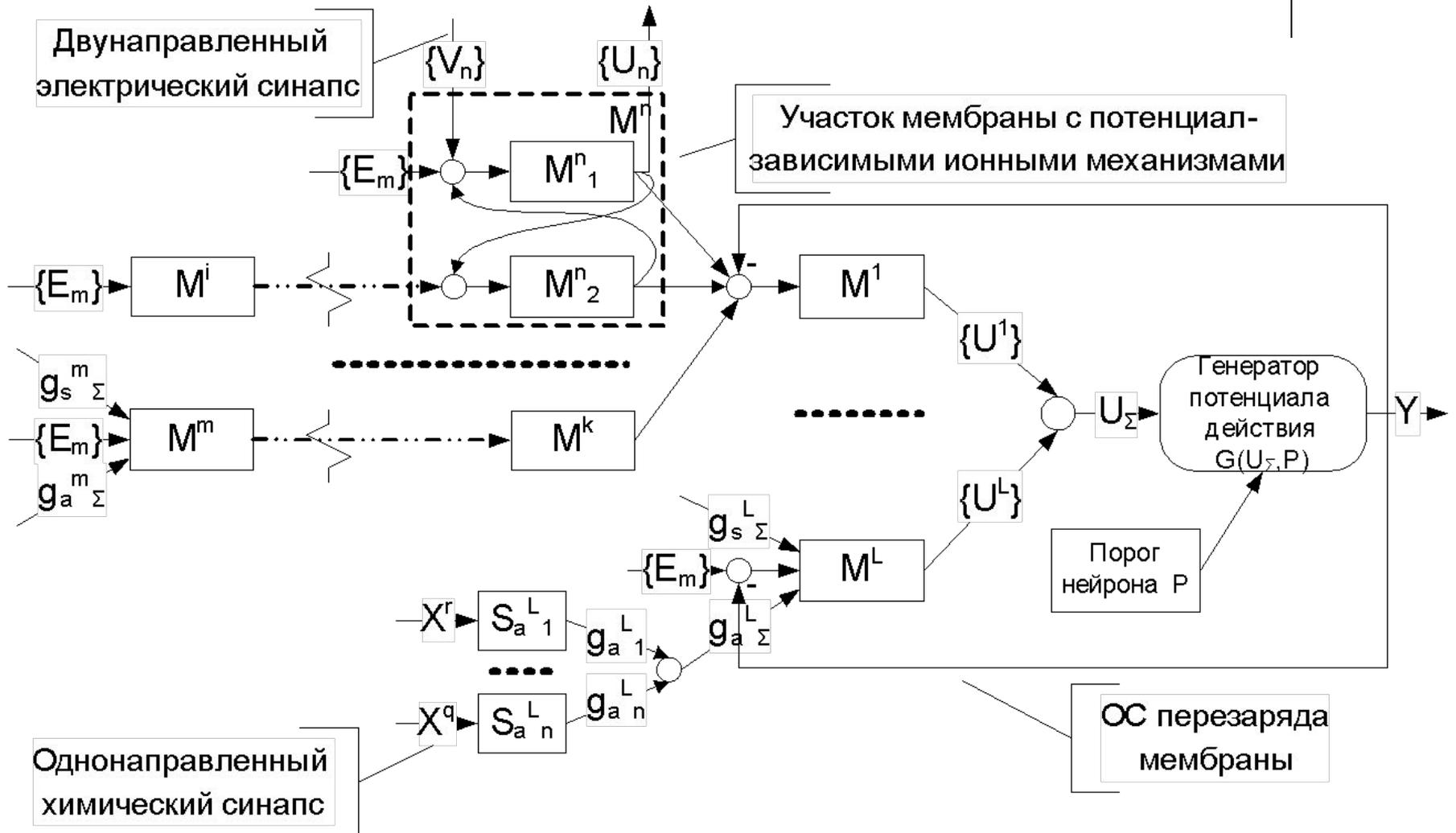


1 – частота разрядов нейрона от числа параллельных включений участков мембраны в сому  
2 – частота разрядов от глубины ОС

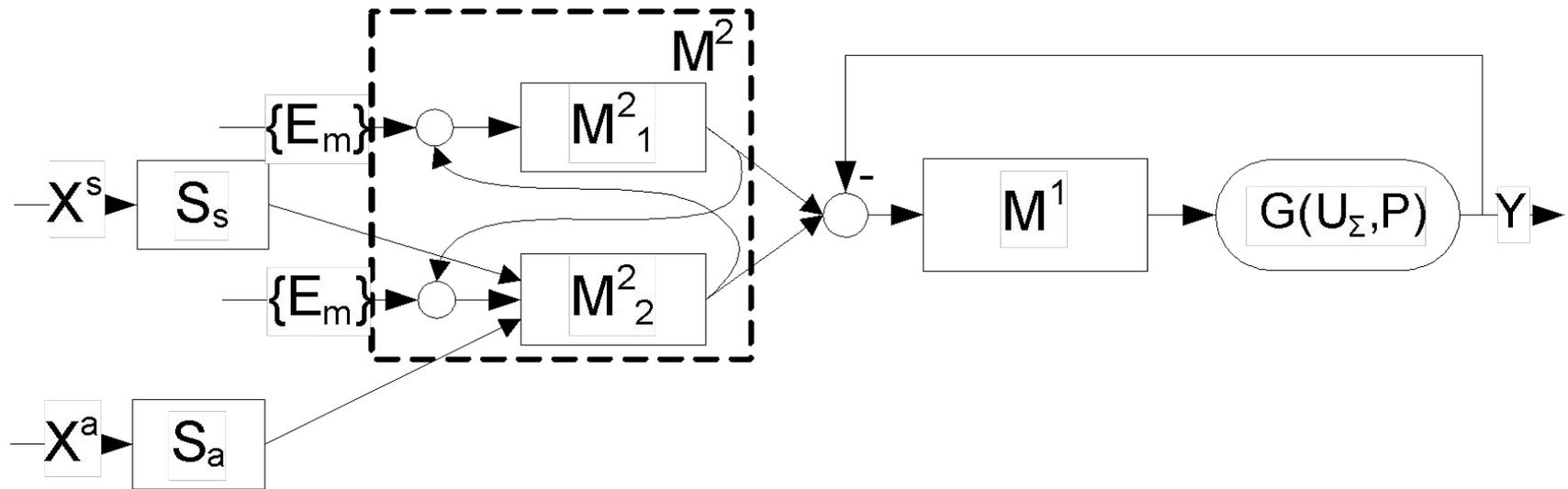
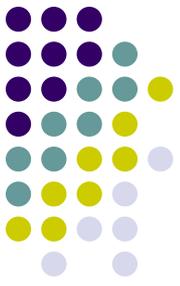
# Электрический синапс



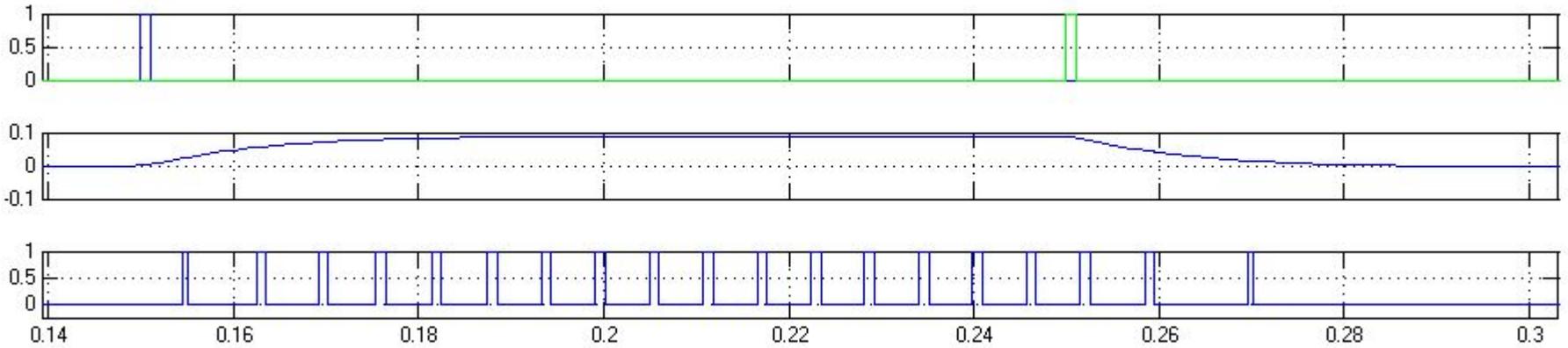
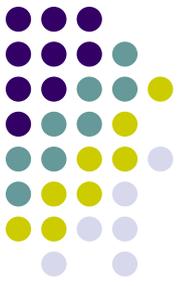
# Модель нейрона – общий вид



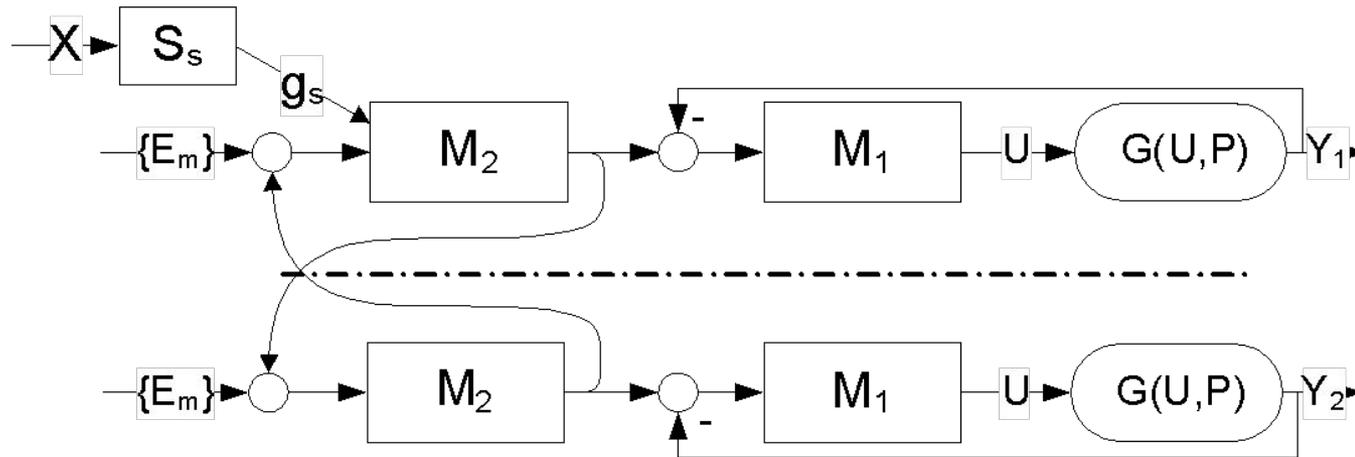
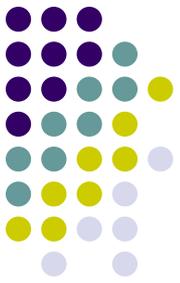
# Нейрон с множеством устойчивых состояний мембранного потенциала



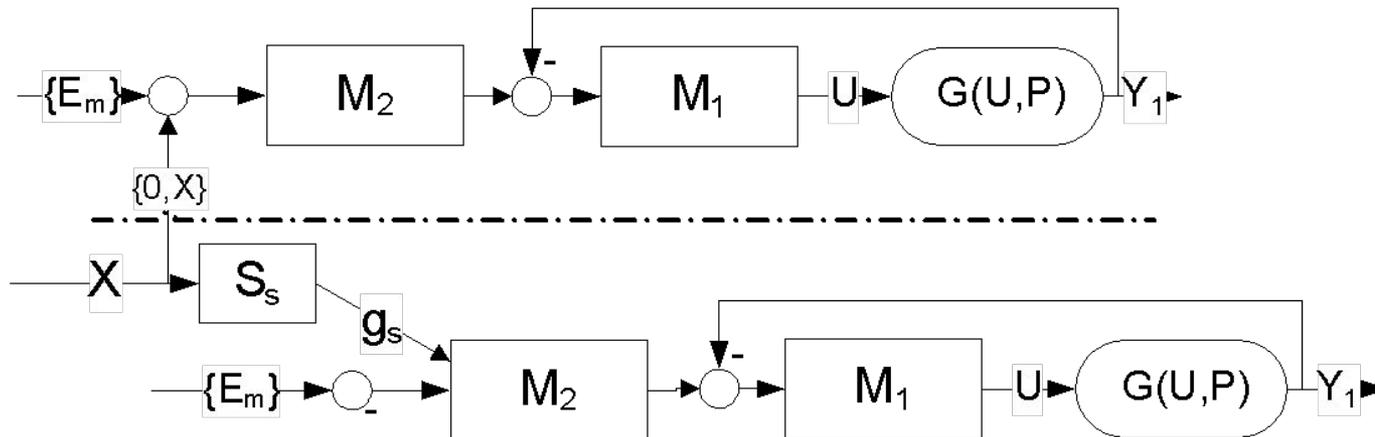
# Нейрон с множеством устойчивых состояний мембранного потенциала - результаты



# Взаимодействие посредством электрического синапса

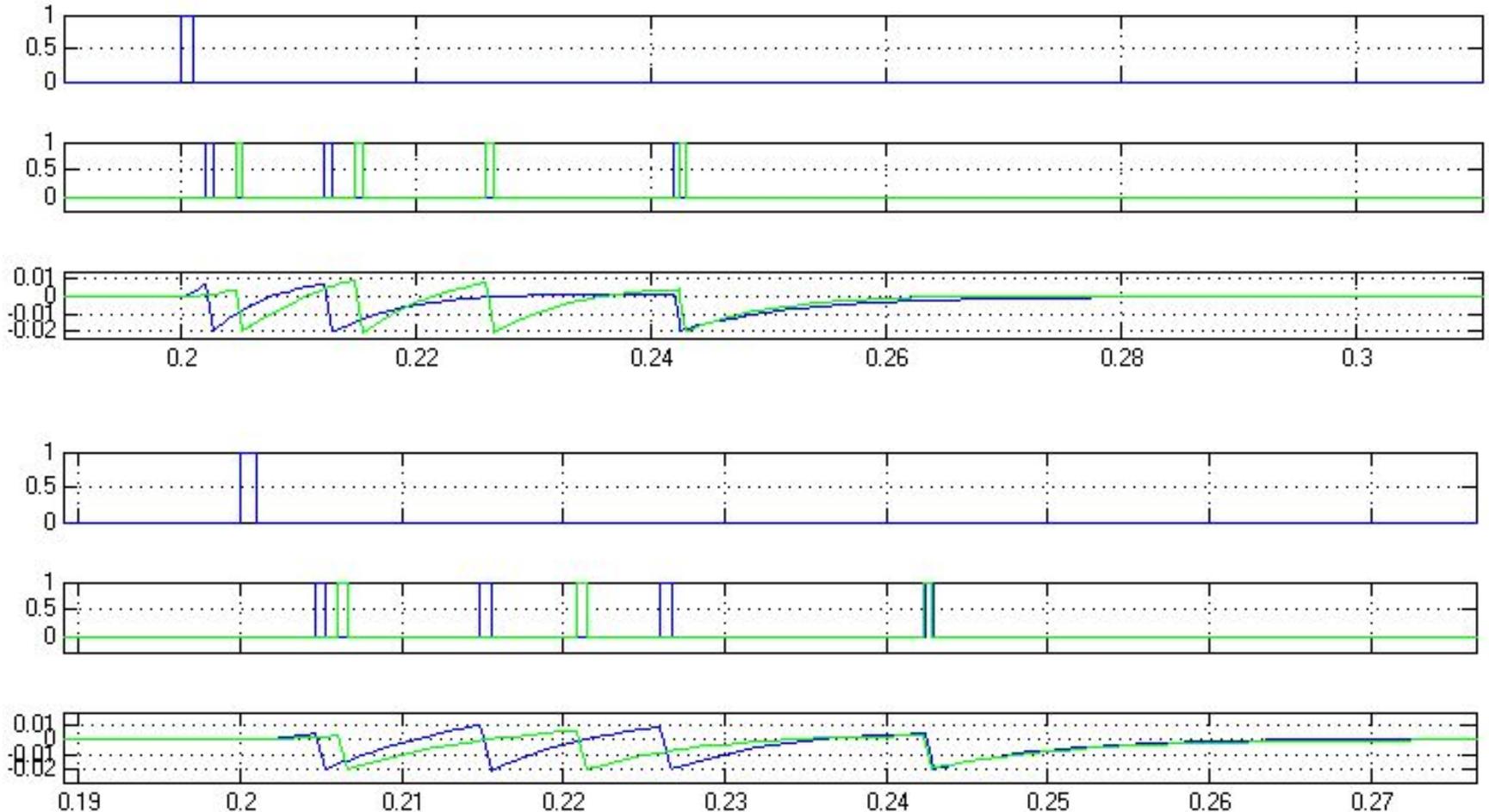
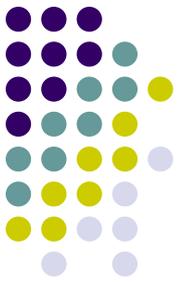


1) Дендро-дендритное взаимодействие мембран двух нейронов

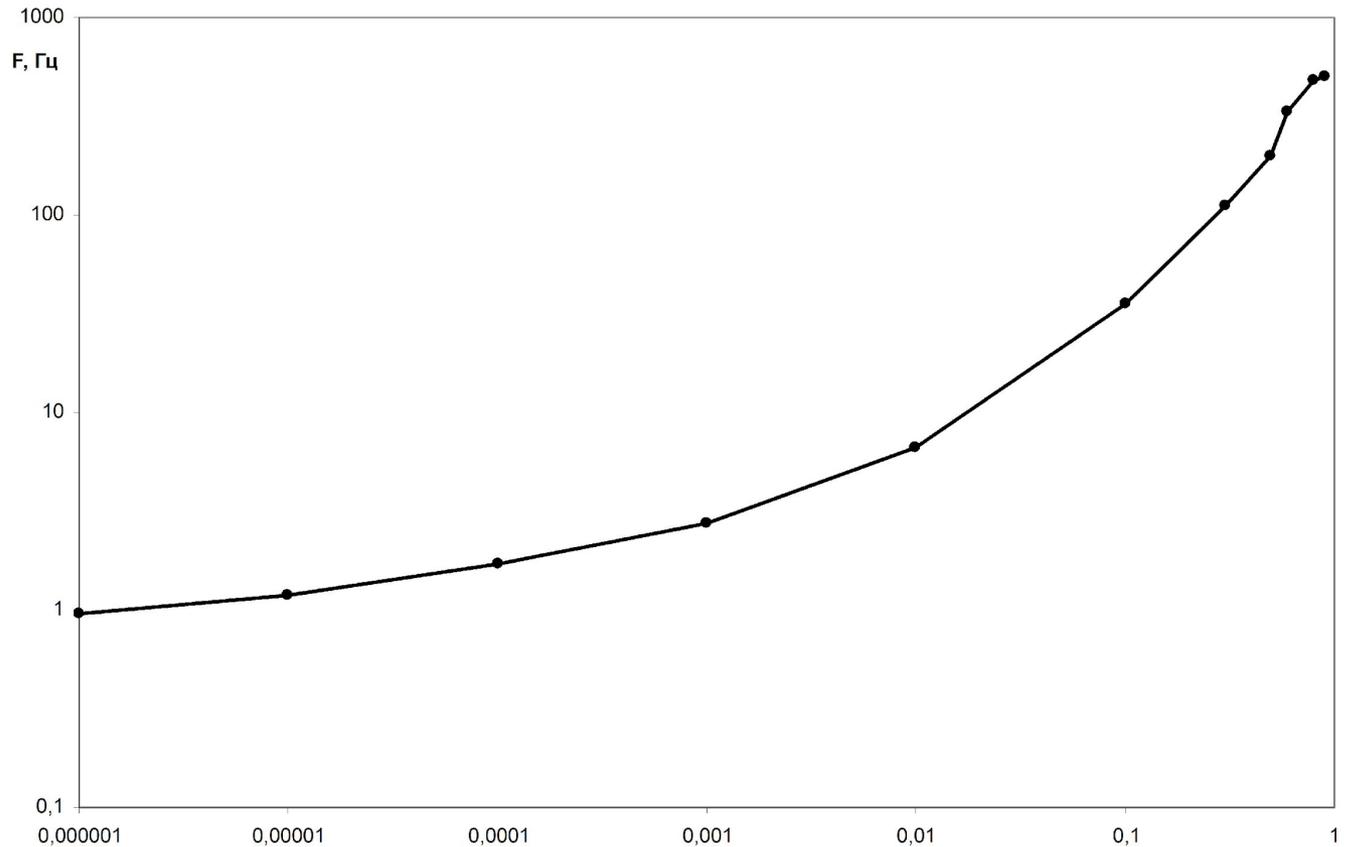
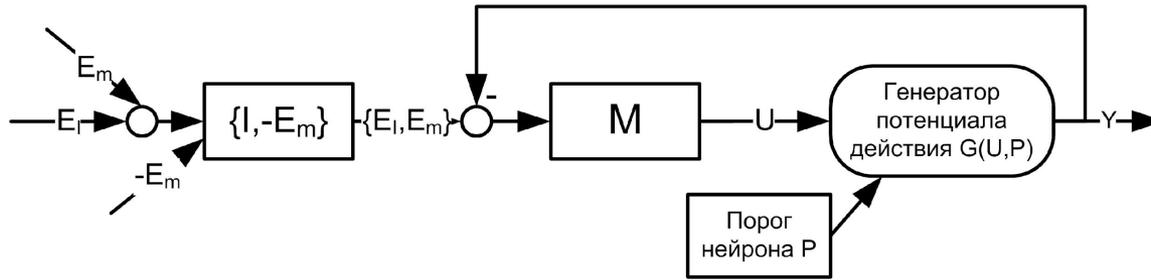
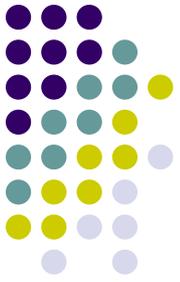


2) Сравнение реакций нейрона при активации через электрический и химический синапс

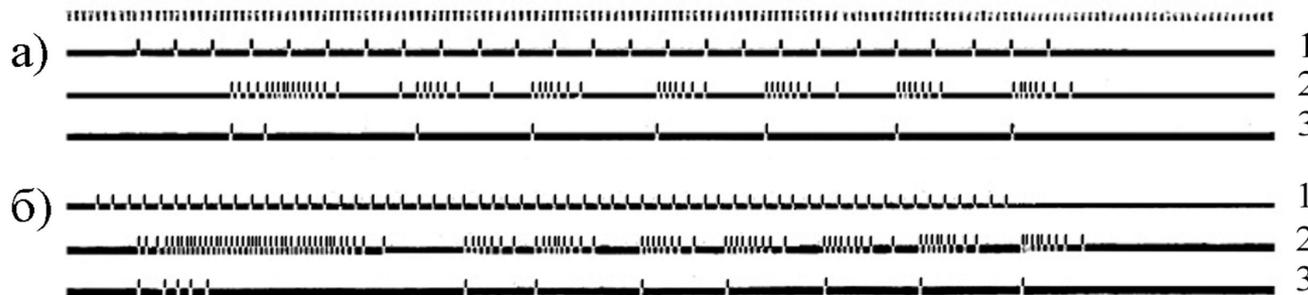
# Взаимодействие посредством электрического синапса - результаты



# Модель афферентного нейрона



# Схема возвратного торможения на примере регуляции разрядов мотонейрона

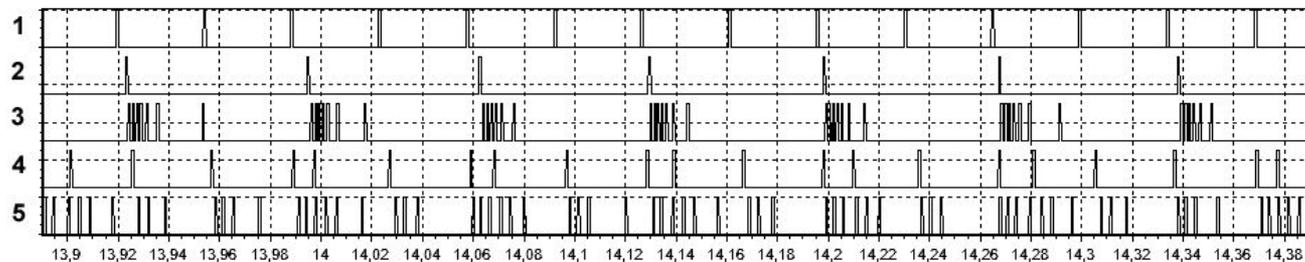


Записи импульсных потоков при исследовании взаимодействия мотонейрона и клетки Реншоу на частоте возбуждения мотонейрона 20 гц (а) и 50 гц (б).

1 – возбуждающий вход мотонейрона;

2 – разряды клетки Реншоу;

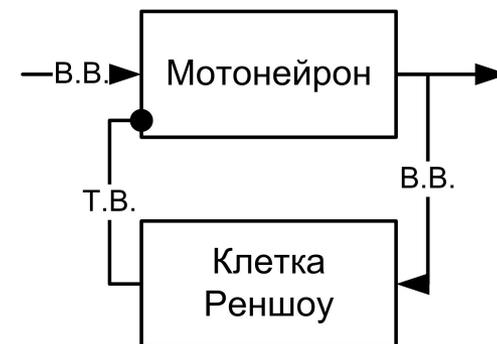
3 – импульсы на выходе мотонейрона. Вверху - отметка времени 10 мс.



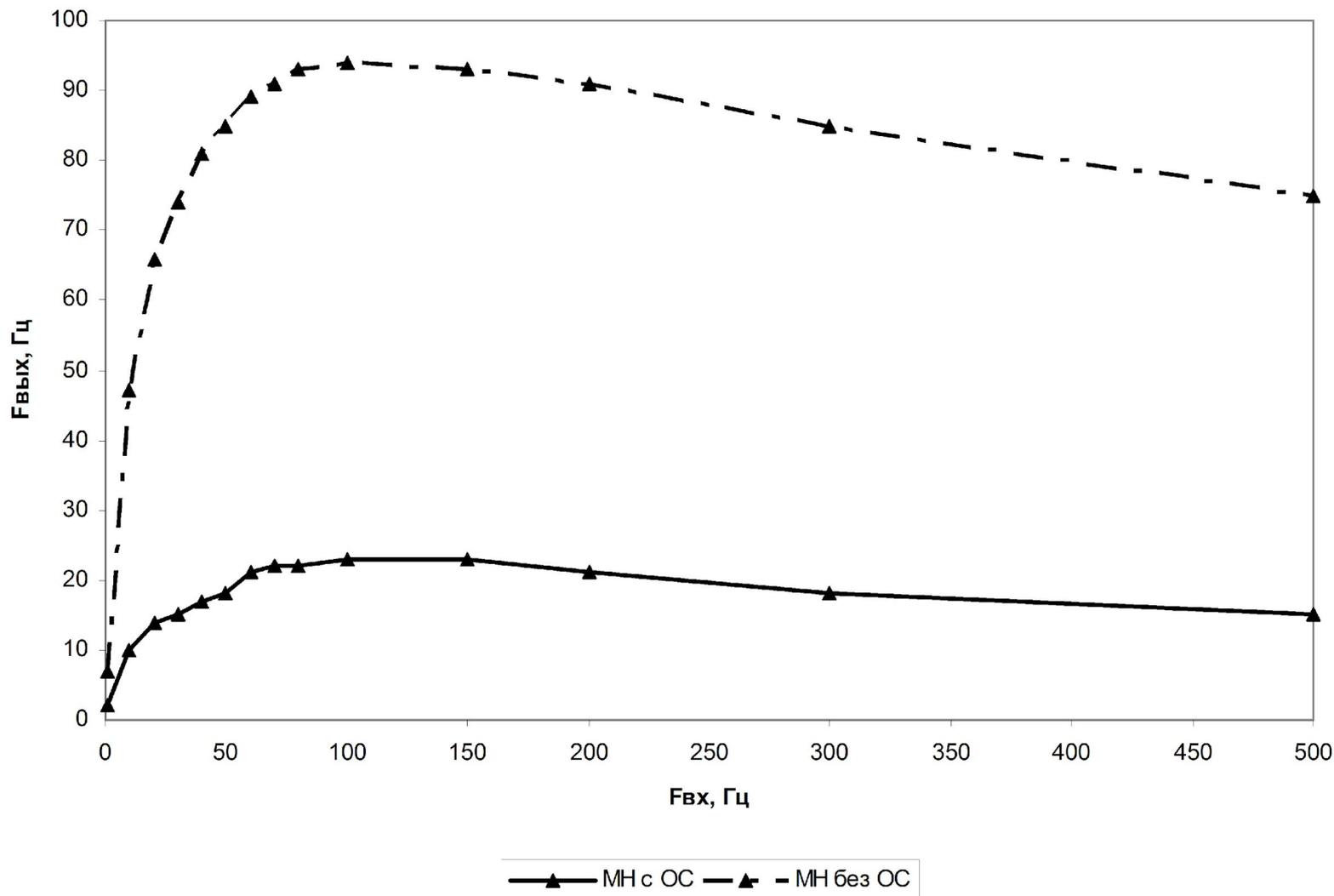
1 – Входной импульсный поток; 2 – реакции мотонейрона с включенной ОС;

3 – реакции клетки Реншоу с включенной ОС; 4 – реакции мотонейрона с

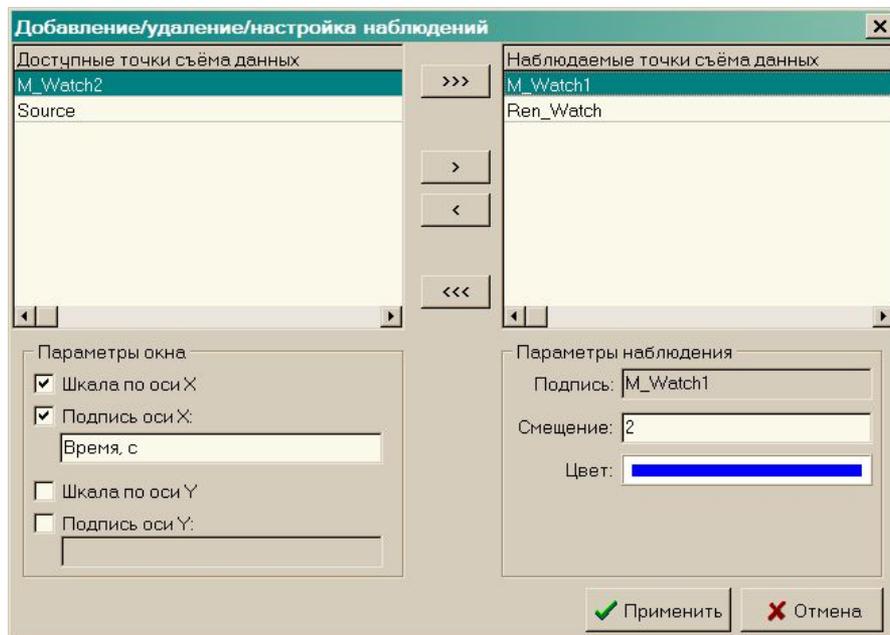
разорванной ОС; 5 – реакции клетки Реншоу с разорванной ОС.



# ЧЧХ мотонейрона с возвратным торможением и в его отсутствии



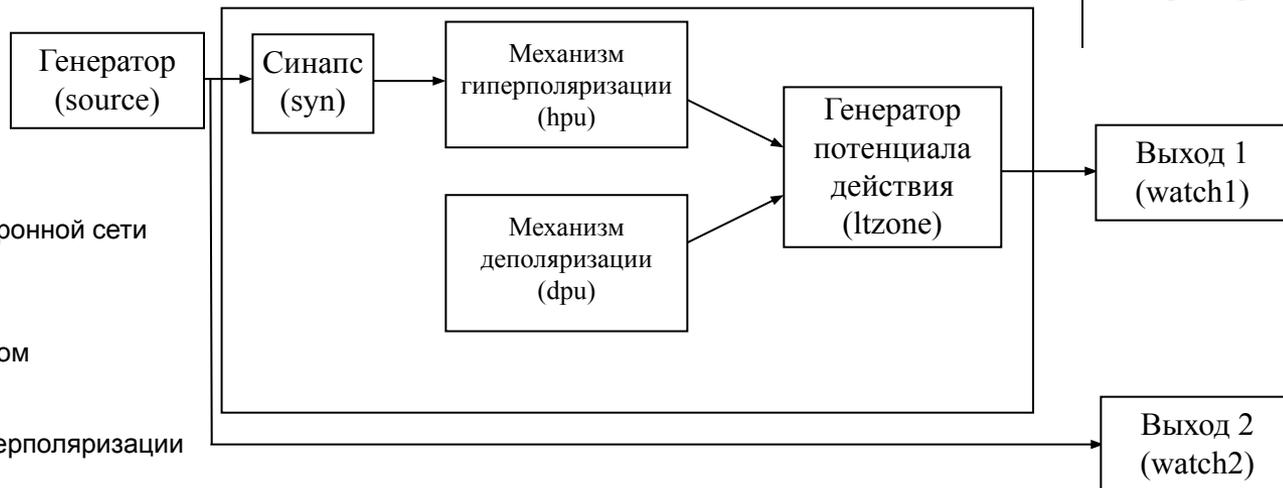
# ПО NeuroModeler



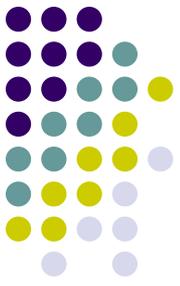
# Пример описания модели сети



```
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 иерархической системы управления объектами, с последовательным наращиванием функциональности такой системы от уровня к уровню.