

Введение в нейронные сети и глубокое обучение

Лекция 1

План лекции

- Литература
- Нейронные сети и глубокое обучение
 - Основные понятия, достоинства и недостатки, примеры применения, инструменты
- Головной мозг человека
 - Нейрон, кора головного мозга, нейропластичность
- Персептрон
 - История, модель нейрона, функция активации, функция ошибки, обучение, примеры
- Функции активации

Литература

- Николенко С., Кадури́н А., Архангельская Е. Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2018
- Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. – 2-е изд., испр. – М.: ДМК Пресс, 2018
- Пойнтер Я. Програ́ммируем с PyTorch: Создание приложений глубокого обучения. – СПб.: Питер, 2020
- Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. – СПб.: Питер, 2018
- Buduma N., Buduma N., Papa J. Fundamentals of Deep Learning. 2nd ed. – O'Reilly Media, 2022
- Zhang A., Lipton Z.C., Li M., Smola A.J. Dive into Deep Learning. <https://d2l.ai>

Нейронные сети и глубокое обучение



- Революция в машинном обучении – *глубокое обучение* (Deep Learning)
 - 2005-2006 – группы Джеффри Хинтона (Geoffrey Hinton) и Йошуа Бенджио (Yoshua Bengio) научились обучать глубокие нейронные сети
- Artificial Intelligence (AI) > Machine Learning (ML) > Neural Networks (NN) > Deep Learning (DL)
- Основные идеи – 1980–1990-е гг.
- Причины успеха:
 - Предобучение без учителя
 - Повышение мощности вычислительной техники + GPU (Graphical Processing Unit)
 - Доступность больших наборов данных
 - Развитие алгоритмов обучения

Достоинства и недостатки

- Достоинства:
 - Высокое качество решения задач
 - Универсальность
 - Способны самостоятельно генерировать новые признаки (не требуется feature engineering)
 - Способны обучаться на неразмеченных данных
- Недостатки:
 - Требуют значительного объема данных для обучения
 - Требуют высоких вычислительных мощностей и длительного времени обучения
 - Плохая интерпретируемость моделей

Примеры применения



Привет, я Алиса



Google Ассистент



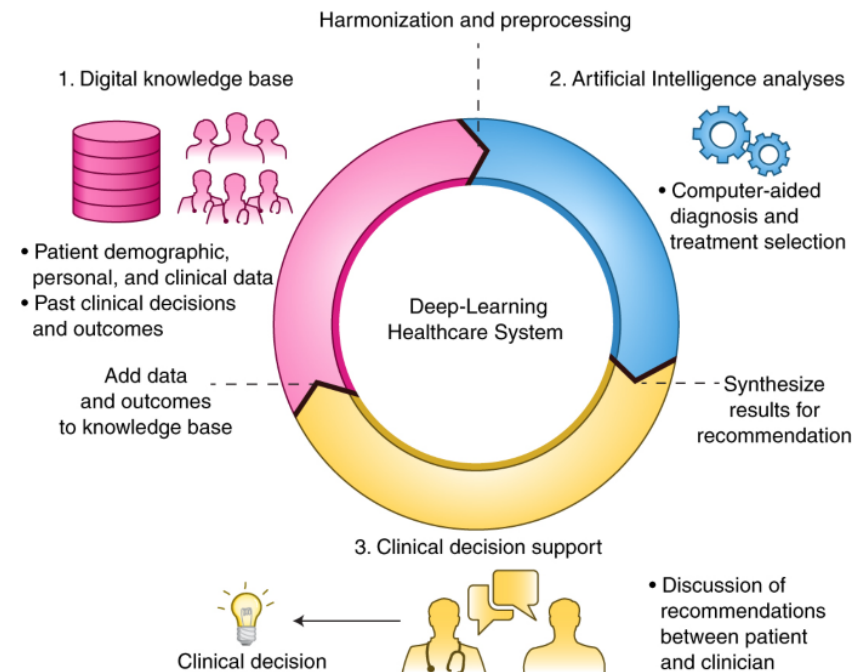
маруся



Hi. I'm Cortana.

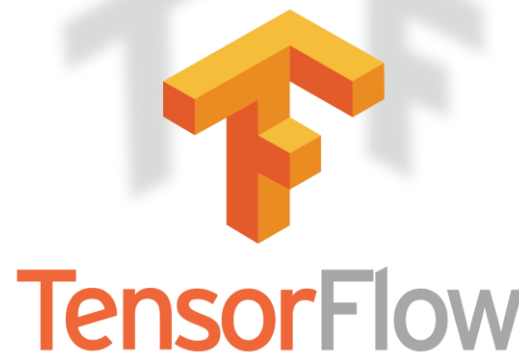


Hey Siri



Инструменты

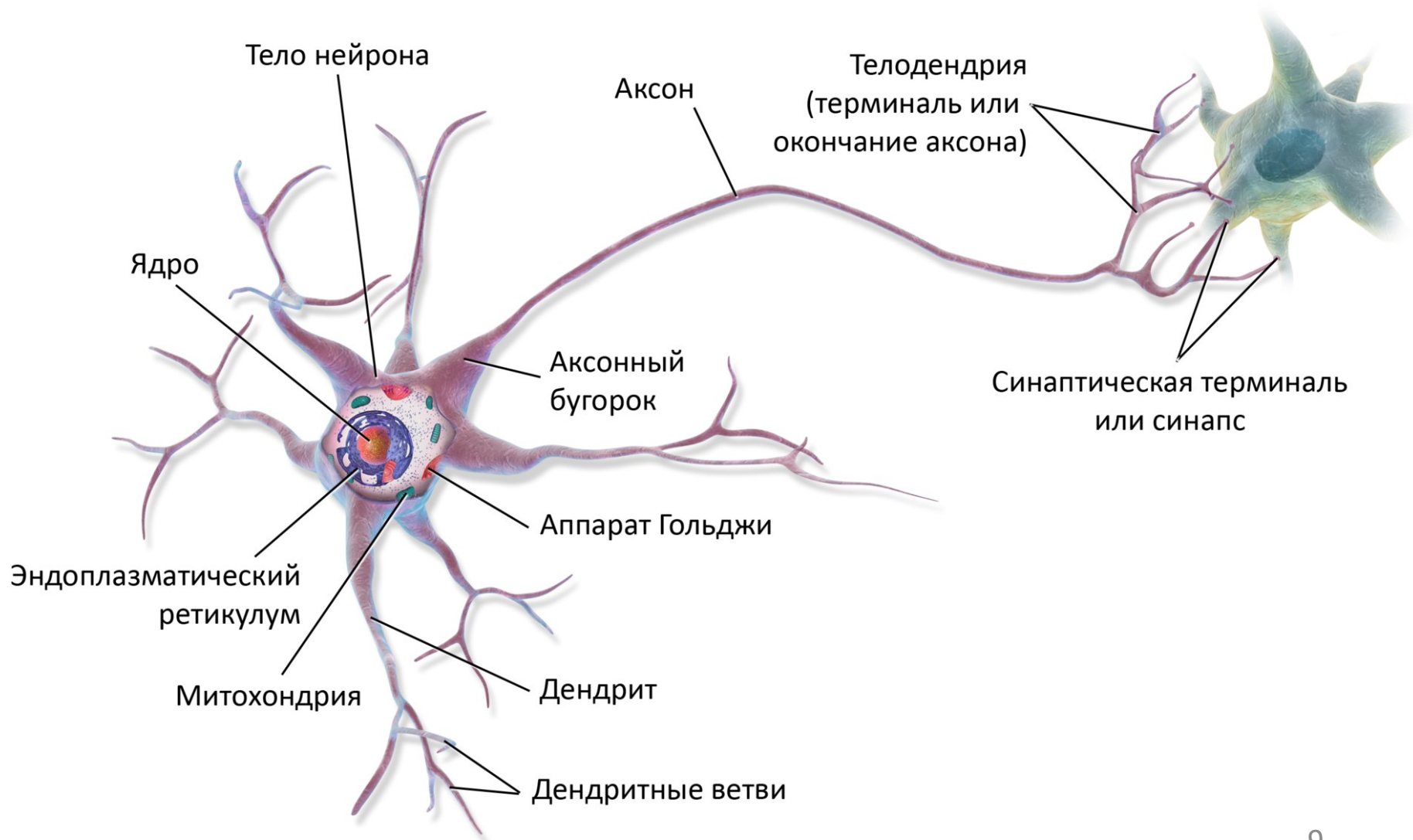
- TensorFlow – Google (2015)
- Keras – Франсуа Шолле (François Chollet) (2015)
- PyTorch – Facebook* (2016)



Нейроны

- Нейрон (neuron) – нервная клетка

Структура нейрона



Нейроны

- Нейрон (neuron) – нервная клетка
- Состоит из тела клетки, аксона и дендритов
- Тело клетки – 3..130 мкм
- Аксон: диаметр – несколько мкм, длина – до 1 м
- Синапс – место связи аксона и дендритов
 - Может как возбуждать, так и тормозить нейрон
- Частота: 10..200 Гц = 5..100 мс
- Распознавание лица: 200 мс
- Распознавание факта наличия животного в естественной сцене: 50 мс

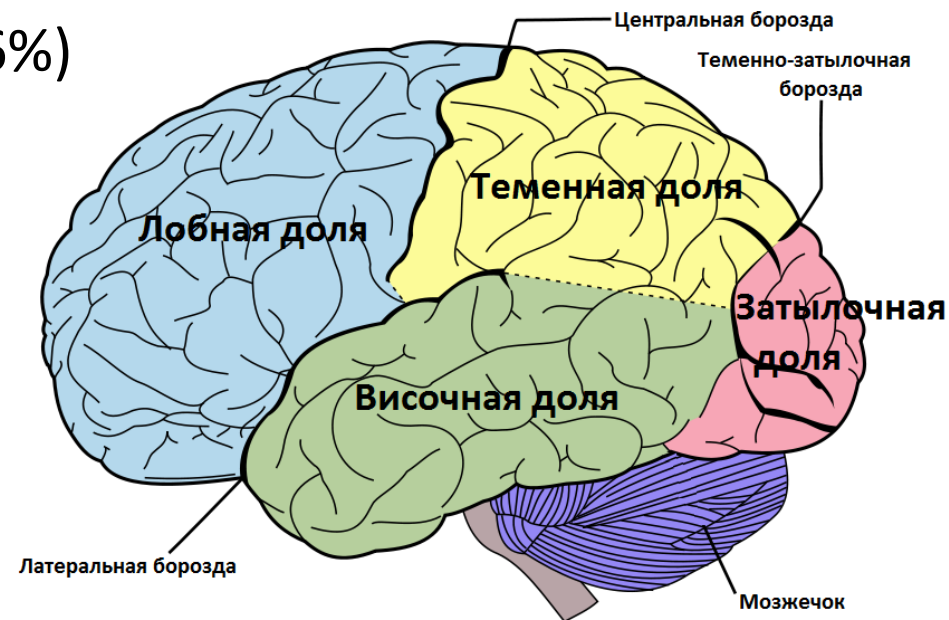
Головной мозг человека

- Головной мозг – орган центральной нервной системы человека
- Содержит примерно 86 млрд нейронов (10^{11})
- Каждый нейрон в среднем связан с 7-10 тысячами других нейронов (до 20 000 связей)
 - Общее количество связей – 10^{15}
- Отделы:
 - продолговатый мозг
 - задний мозг (мост, мозжечок и эпифиз)
 - средний мозг
 - промежуточный мозг
 - передний мозг (большие полушария)



Головной мозг человека

- Кора больших полушарий головного мозга (cerebral cortex) – слой серого вещества, покрывающий большие полушария
- Толщина 1.3–4.5 мм, более 80% массы мозга
- В коре содержится 10–14 млрд нейронов
- 4 типа коры (неокортекс – 95.6%)
- 5 долей, 6 слоев
- [Blue Brain Project](#) (с 2005)
- [Human Brain Project](#) (с 2013)

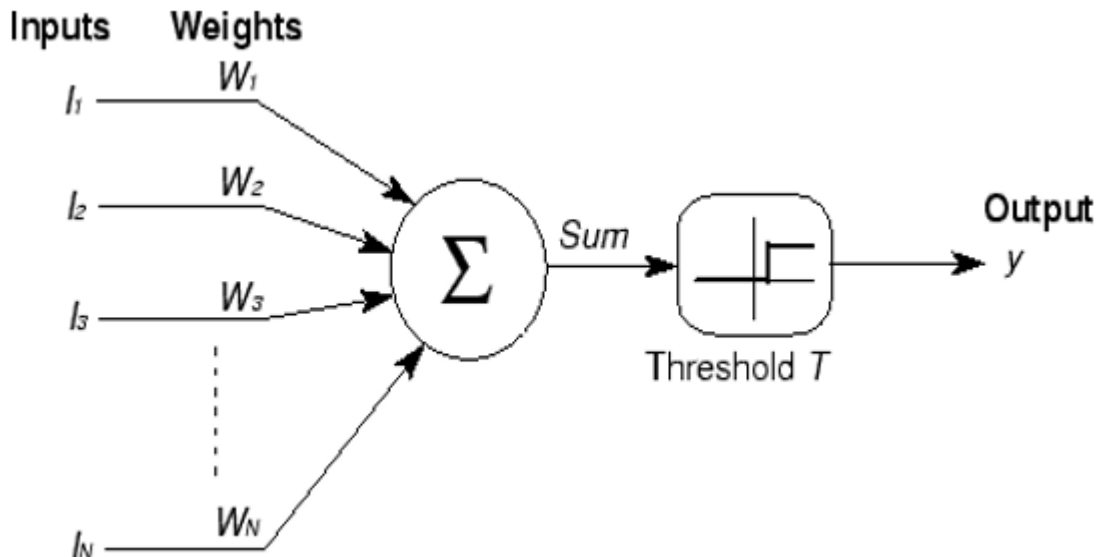
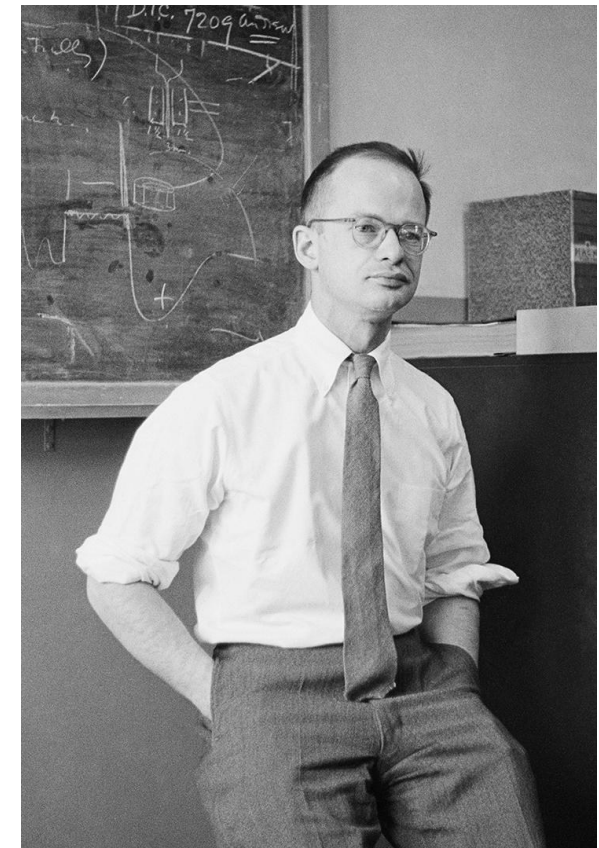
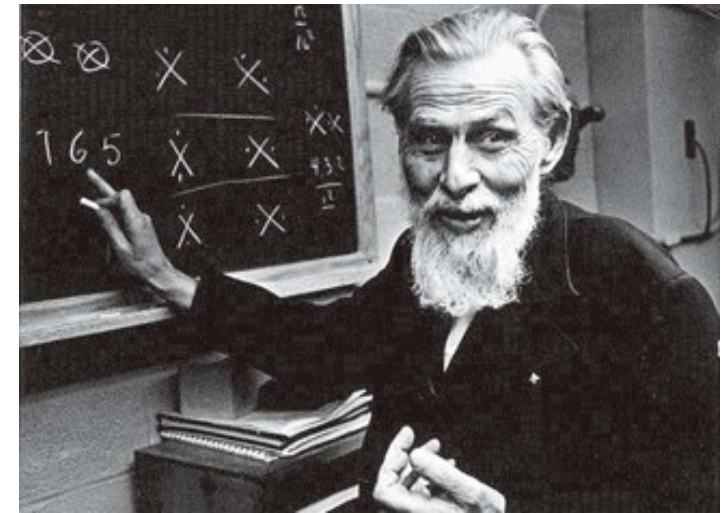


Нейропластичность



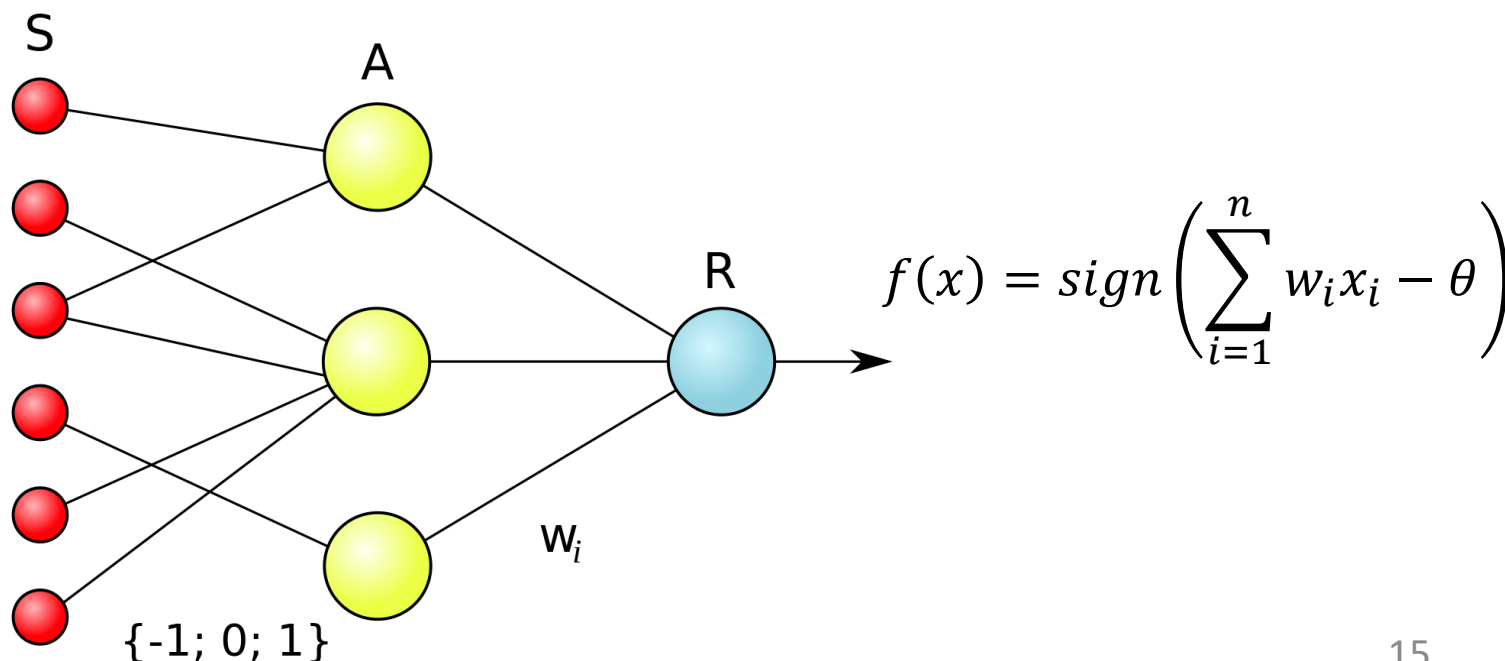
Первая модель нейрона

- 1943 год: Уоррен Мак-Каллок (Warren McCulloch, 1898-1969) и Уолтер Питтс (Walter Pitts, 1923-1969) предложили модель нейрона для логического вывода

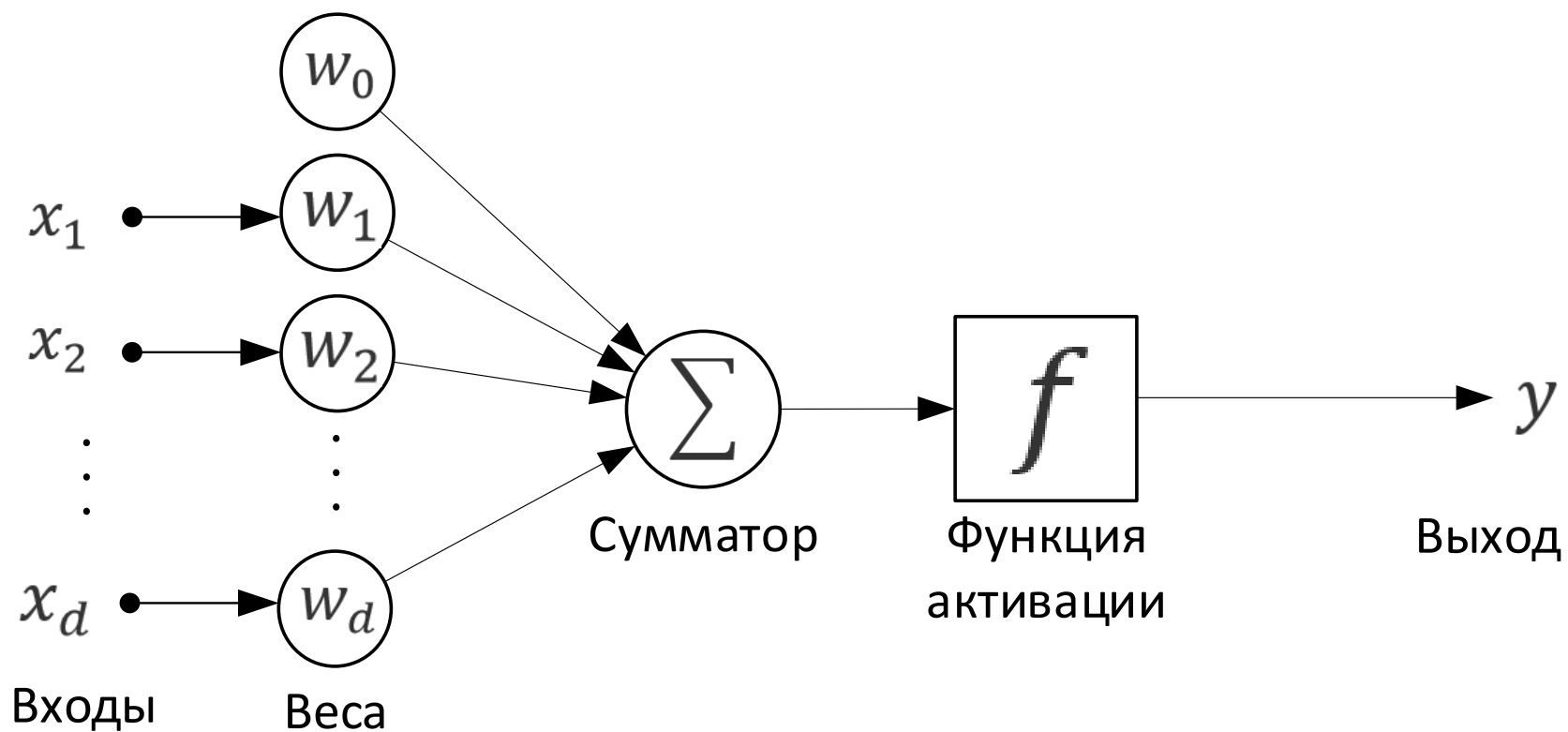


Персептрон

- 1957 год: Фрэнк Розенблатт (Frank Rozenblatt, 1928–1971) предложил алгоритм обучения для определенной структуры нейронной сети, названной им *персептроном* (perceptron)



Модель нейрона



Модель нейрона

- $\mathbb{X} = \mathbb{R}^d$ – пространство объектов
- $Y = \{-1, +1\}$ – множество допустимых ответов
- $X = \{(\vec{x}_i, y_i)\}_{i=1}^l$ – обучающая выборка

$$a(\vec{x}) = \text{sign}(\langle \vec{w}, \vec{x} \rangle + w_0) = \text{sign} \left(\sum_{j=1}^d w_j x_j + w_0 \right)$$

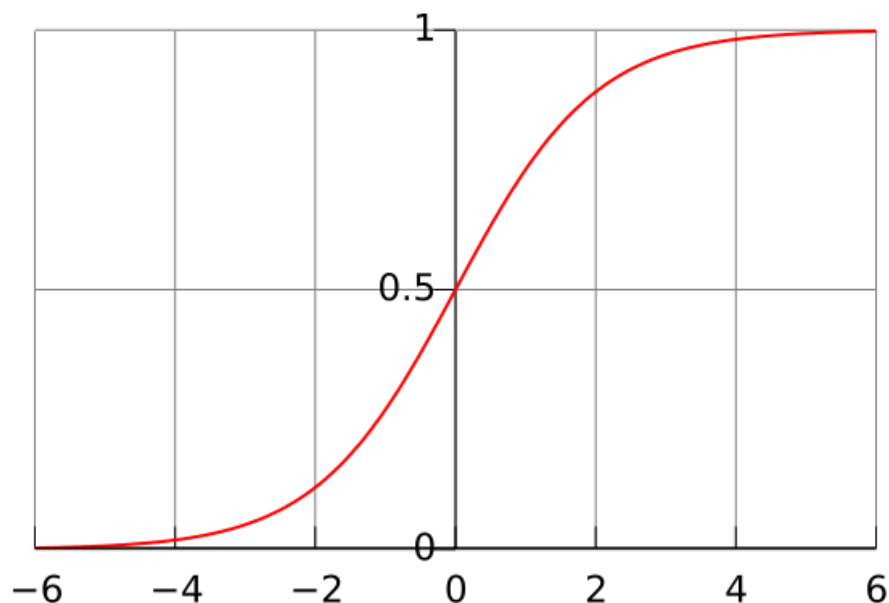
$$\vec{x} = (1, x_1, \dots, x_d), \quad \vec{w} = (w_0, w_1, \dots, w_d)$$

$$a(\vec{x}) = \text{sign}(\langle \vec{w}, \vec{x} \rangle) = \text{sign} \left(\sum_{j=0}^d w_j x_j \right)$$

Функция активации

- Сигмоидальная (логистическая) функция активации:

$$h(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}}$$

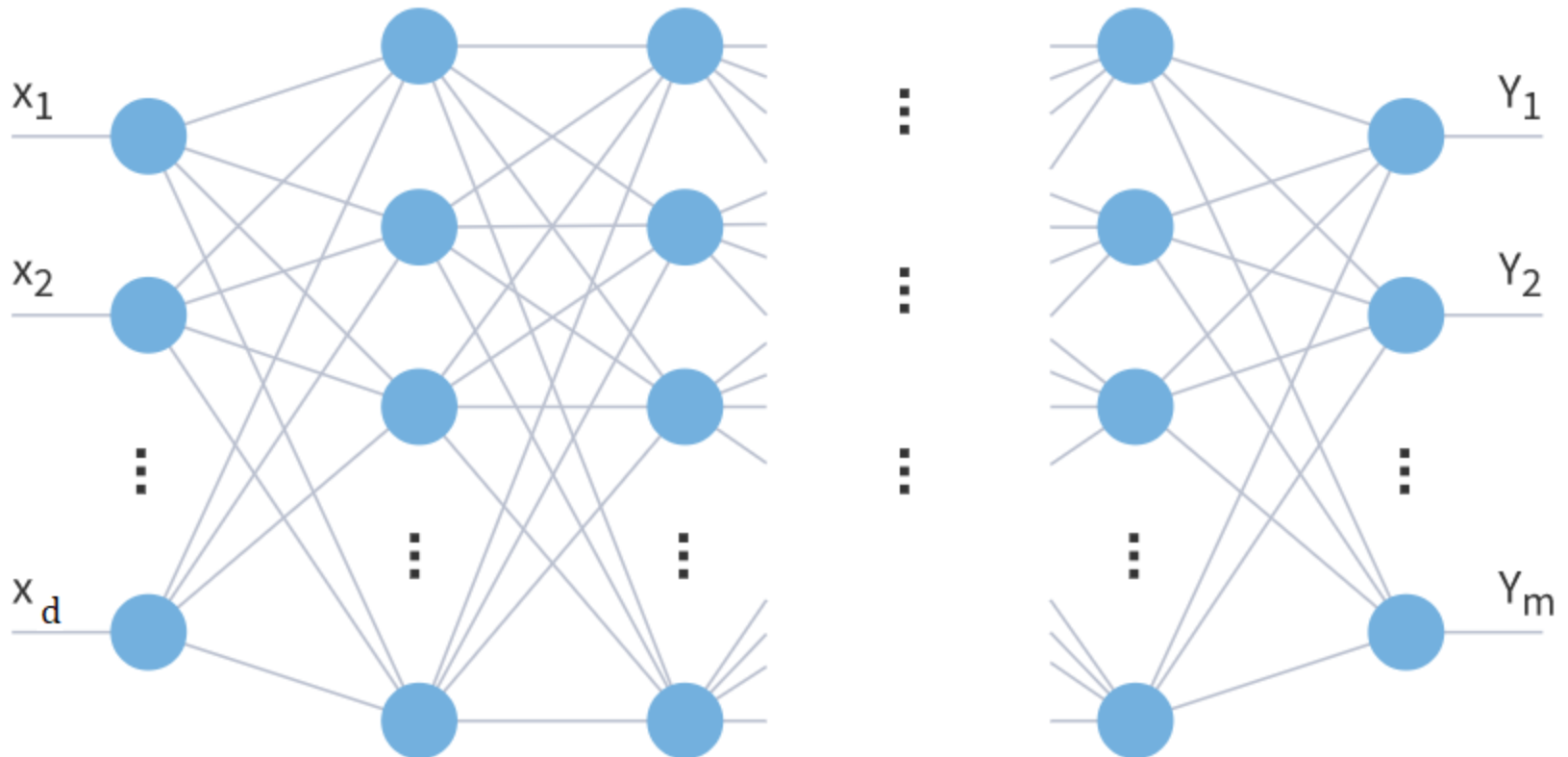


Многослойный персептрон

Входной слой

Скрытые слои

Выходной слой



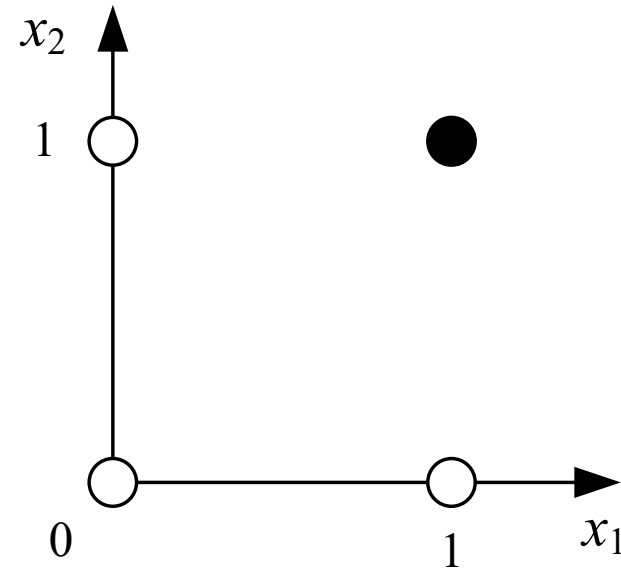
Многослойный персептрон

Виды персептронов:

- Однослойный персептрон – линейная модель
- Персептрон с одним скрытым слоем – классический персептрон Розенблатта
- Многослойный персептрон (по Розенблатту) – персептрон с несколькими необучаемыми слоями и одним обучаемым (выходным) слоем
- Многослойный персептрон (по Румельхарту) – персептрон с несколькими обучаемыми слоями
 - Multilayer Perceptron (MLP)
 - Feedforward Neural Network (FFNN) – часто как синоним

Пример: AND

x_1	x_2	$x_1 \text{ AND } x_2$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

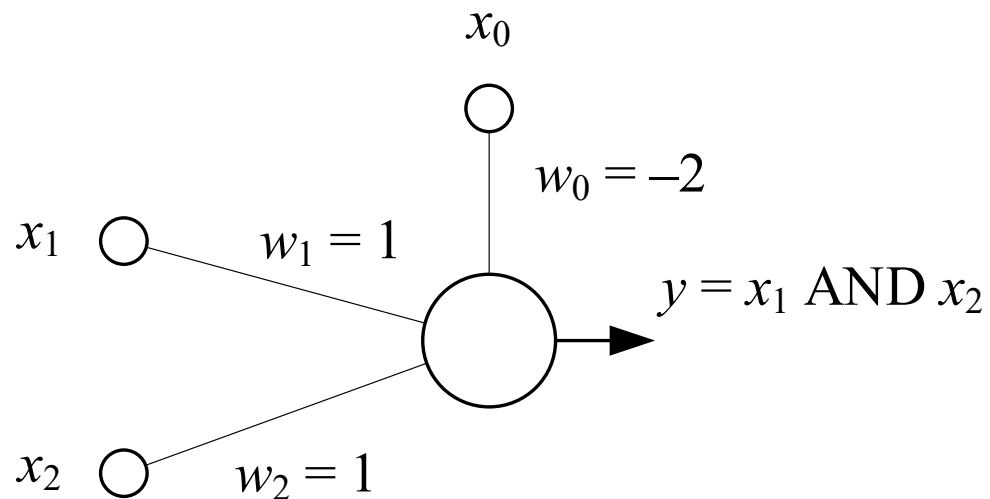


$$a(\vec{x}) = h(w_0 + w_1x_1 + w_2x_2)$$

$$w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 = 0$$

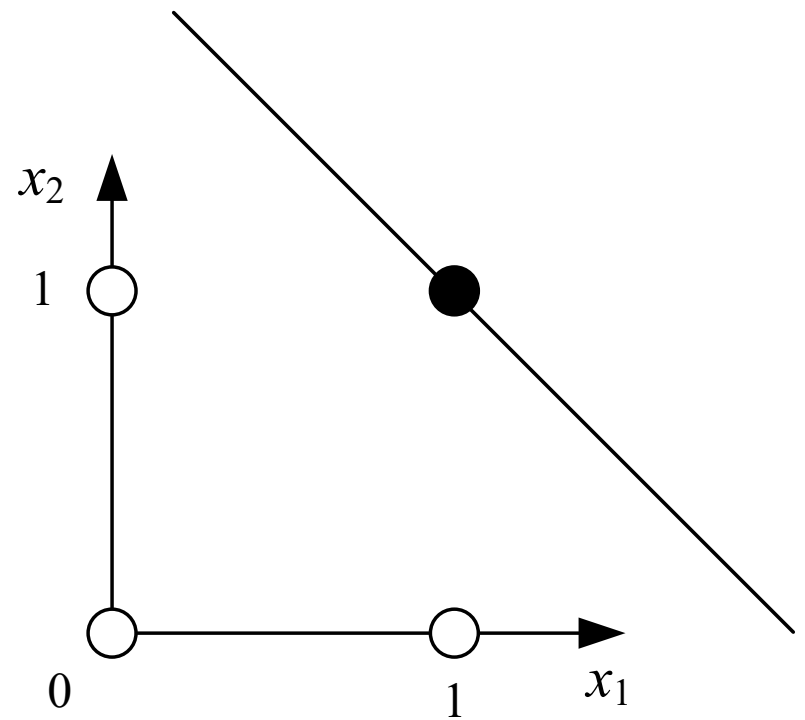
$$-2 + x_1 + x_2 = 0$$

$$x_2 = -x_1 + 2$$



Пример: AND

x_1	x_2	$x_1 \text{ AND } x_2$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

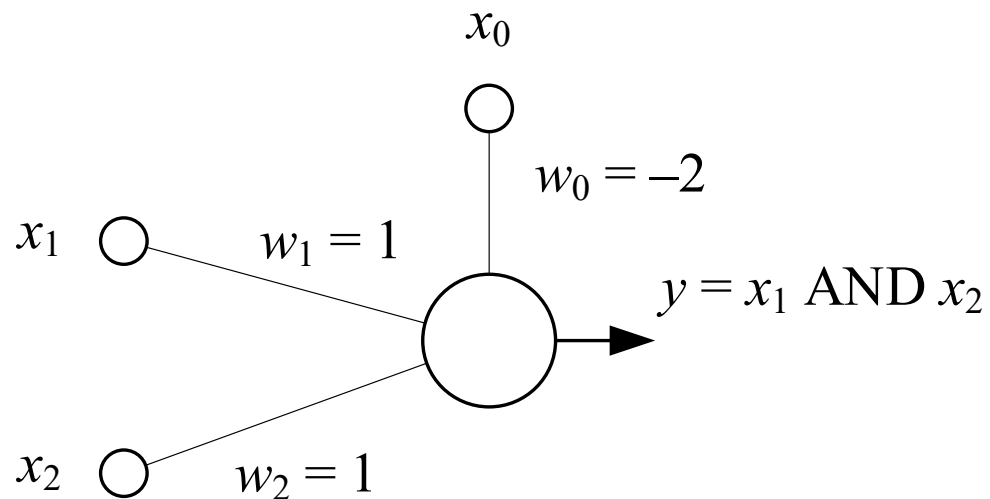


$$a(\vec{x}) = h(w_0 + w_1x_1 + w_2x_2)$$

$$w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 = 0$$

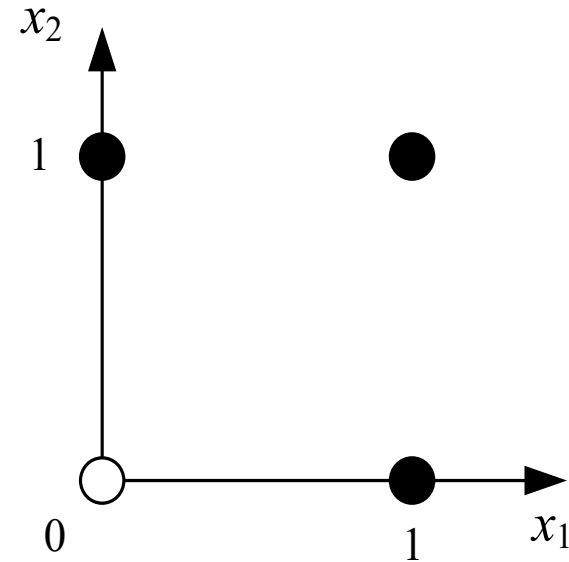
$$-2 + x_1 + x_2 = 0$$

$$x_2 = -x_1 + 2$$



Пример: OR

x_1	x_2	$x_1 \text{ OR } x_2$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

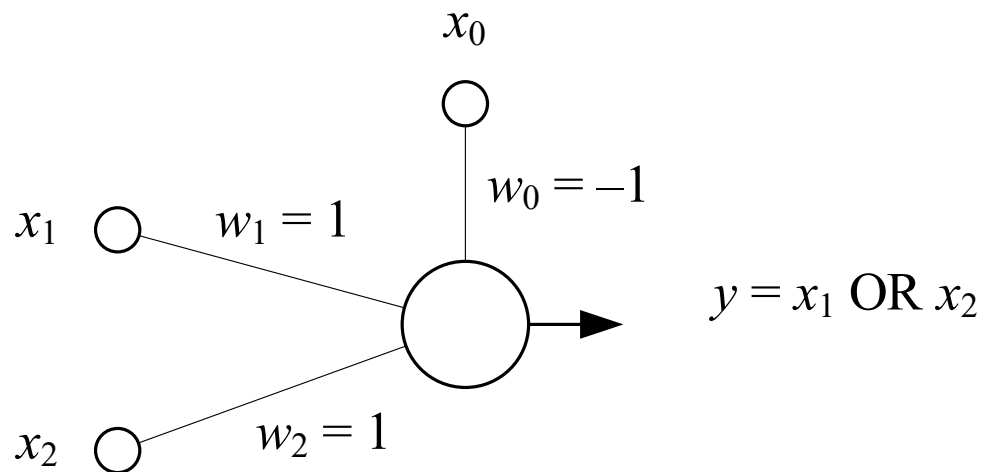


$$a(\vec{x}) = h(w_0 + w_1x_1 + w_2x_2)$$

$$w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 = 0$$

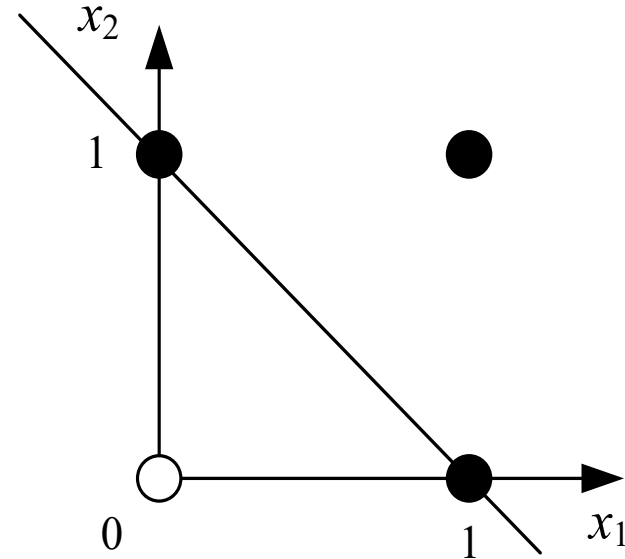
$$-1 + x_1 + x_2 = 0$$

$$x_2 = -x_1 + 1$$



Пример: OR

x_1	x_2	$x_1 \text{ OR } x_2$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

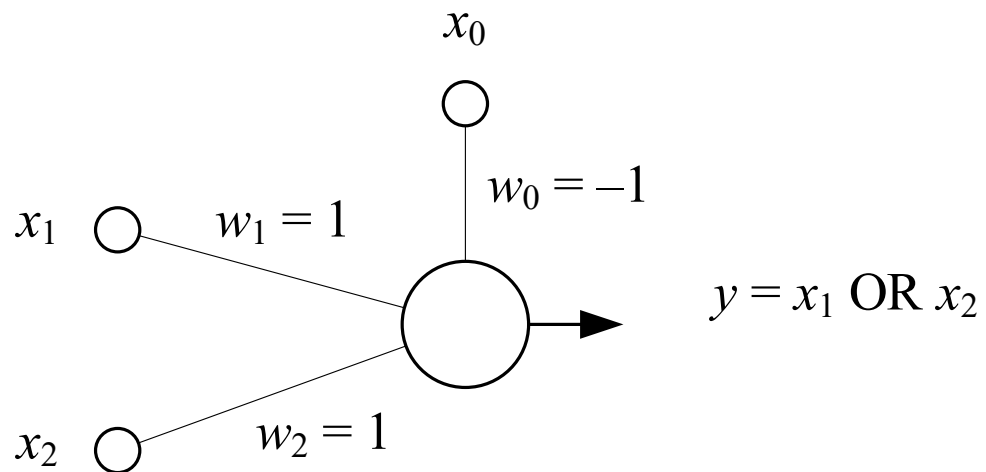


$$a(\vec{x}) = h(w_0 + w_1x_1 + w_2x_2)$$

$$w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 = 0$$

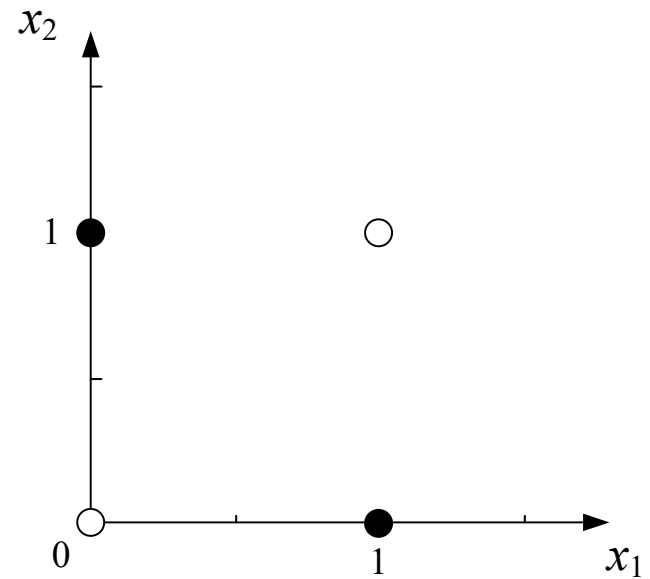
$$-1 + x_1 + x_2 = 0$$

$$x_2 = -x_1 + 1$$



Пример XOR

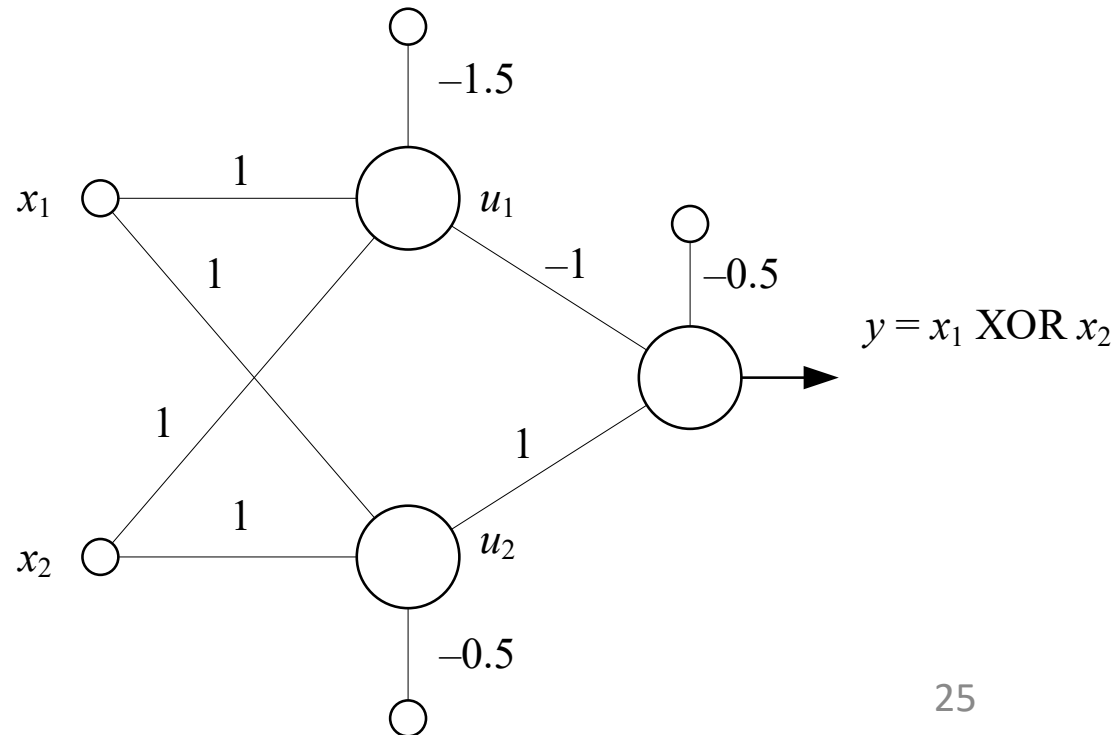
x_1	x_2	$x_1 \text{ XOR } x_2$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



$$-1.5 + x_1 + x_2 = 0$$

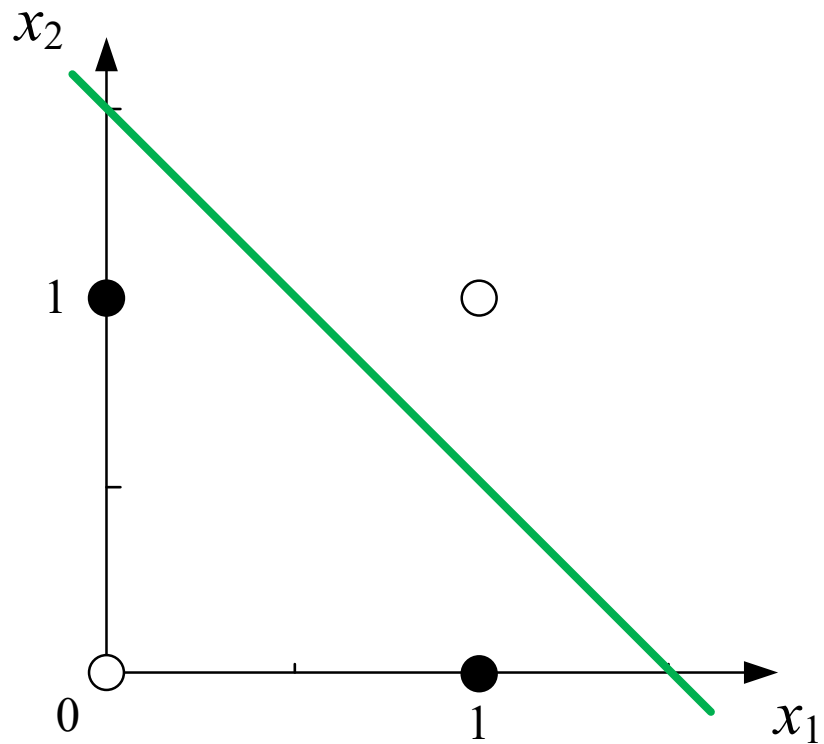
$$-0.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$-0.5 - u_1 + u_2 = 0$$



Пример XOR

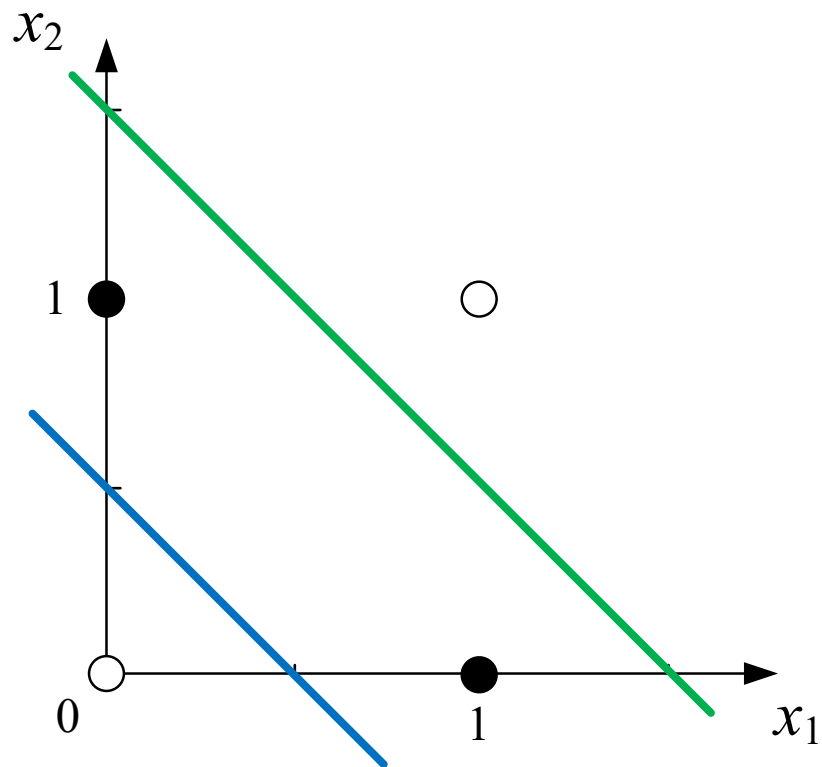
$$-1.5 + x_1 + x_2 = 0$$



Пример XOR

$$-1.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$-0.5 + x_1 + x_2 = 0$$



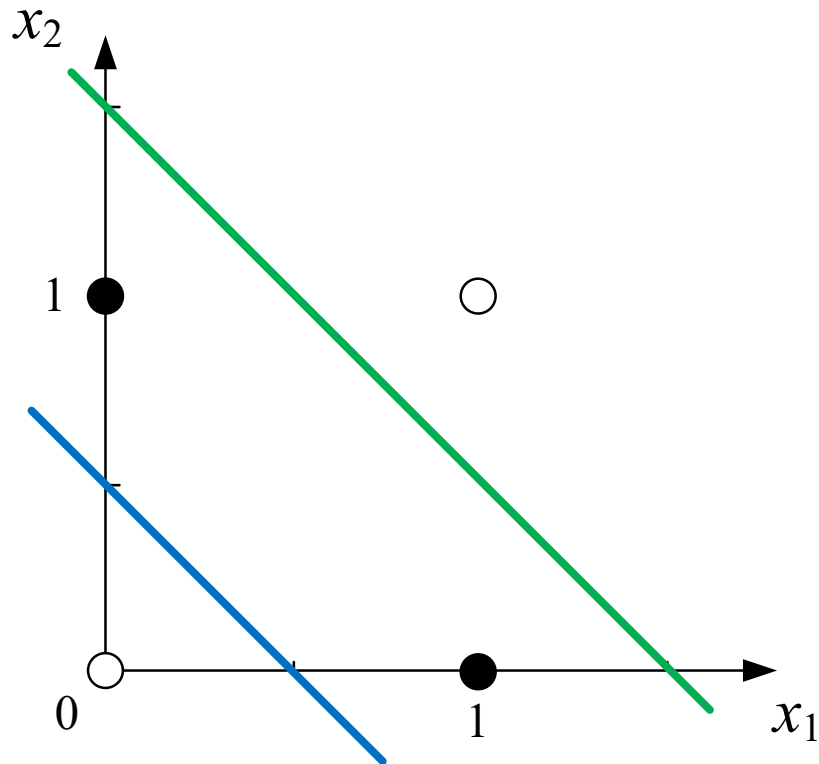
Пример XOR

$$-1.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$-0.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$u_1 = f(-1.5 + x_1 + x_2)$$

$$u_2 = f(-0.5 + x_1 + x_2)$$



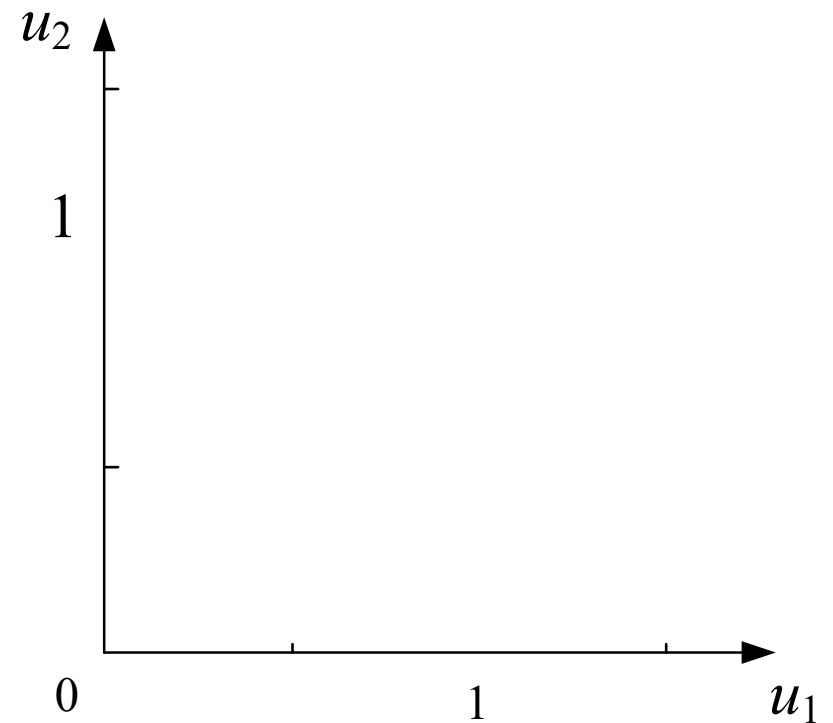
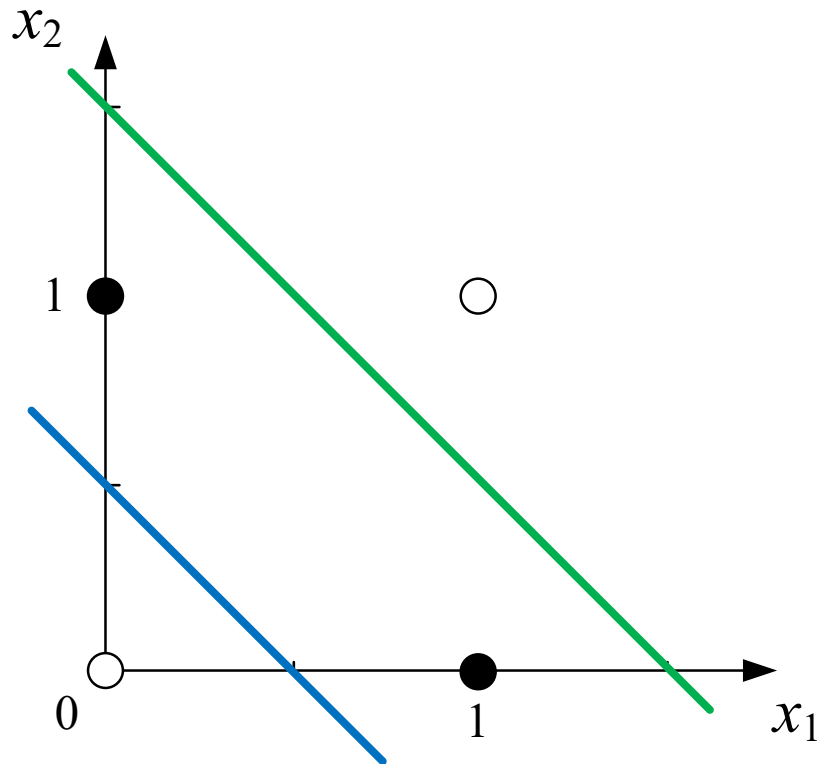
Пример XOR

$$-1.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$-0.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$u_1 = f(-1.5 + x_1 + x_2)$$

$$u_2 = f(-0.5 + x_1 + x_2)$$



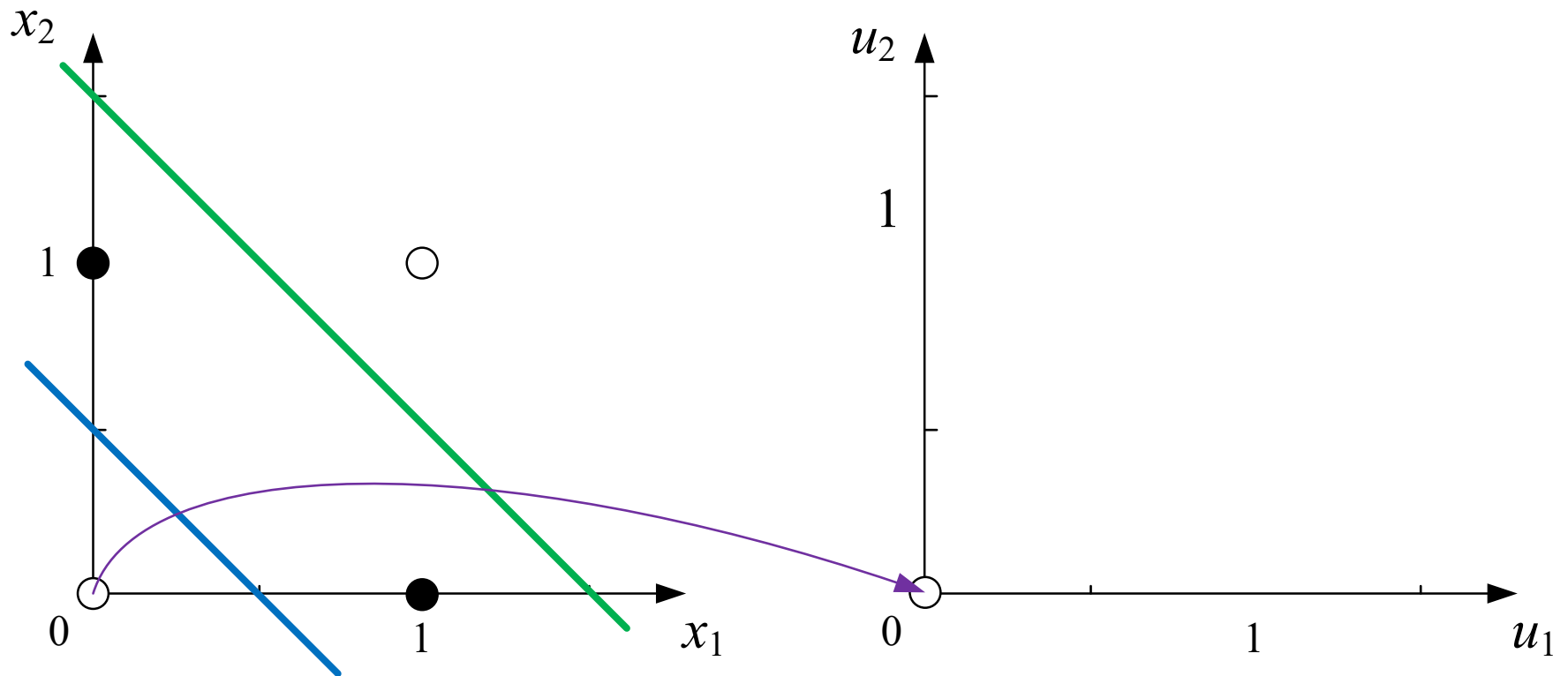
Пример XOR

$$-1.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$-0.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$u_1 = f(-1.5 + x_1 + x_2)$$

$$u_2 = f(-0.5 + x_1 + x_2)$$



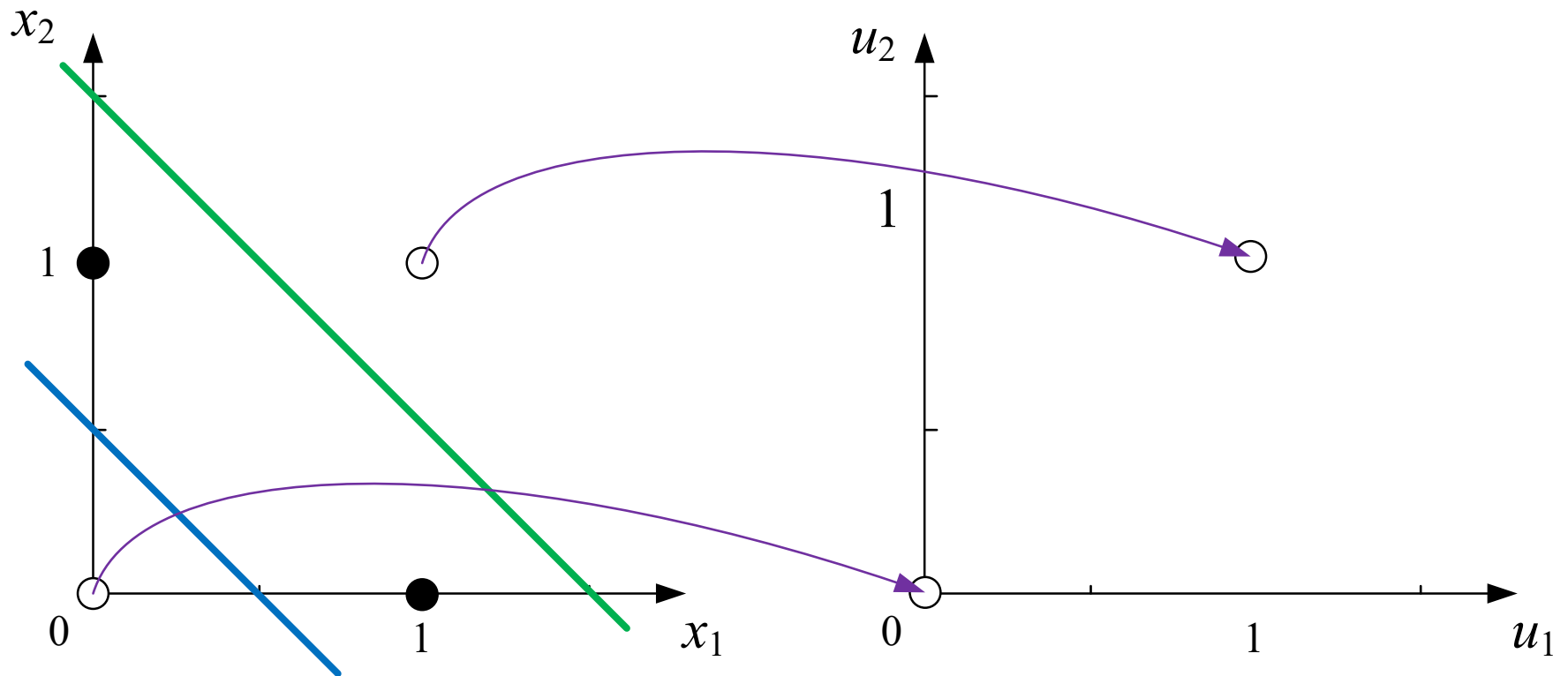
Пример XOR

$$-1.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$-0.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$u_1 = f(-1.5 + x_1 + x_2)$$

$$u_2 = f(-0.5 + x_1 + x_2)$$



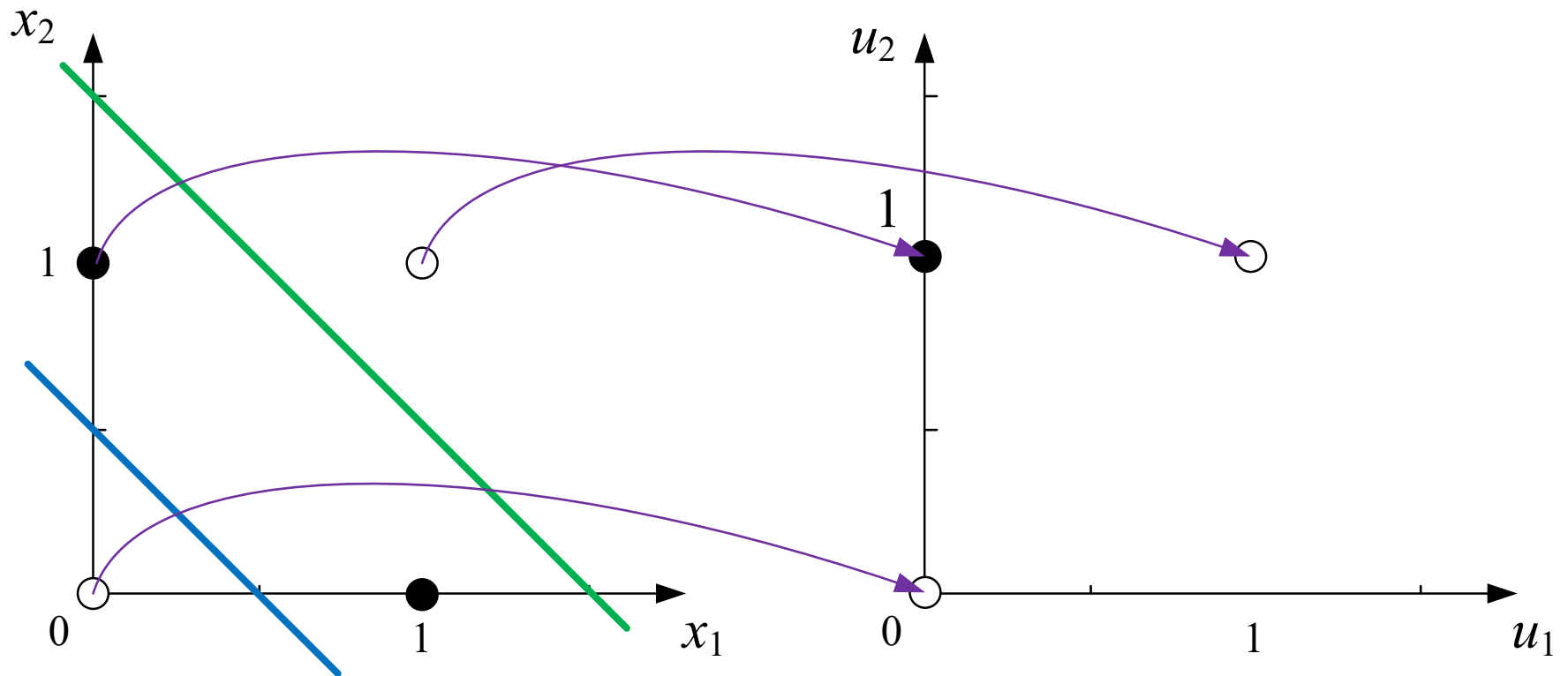
Пример XOR

$$-1.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$-0.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$u_1 = f(-1.5 + x_1 + x_2)$$

$$u_2 = f(-0.5 + x_1 + x_2)$$



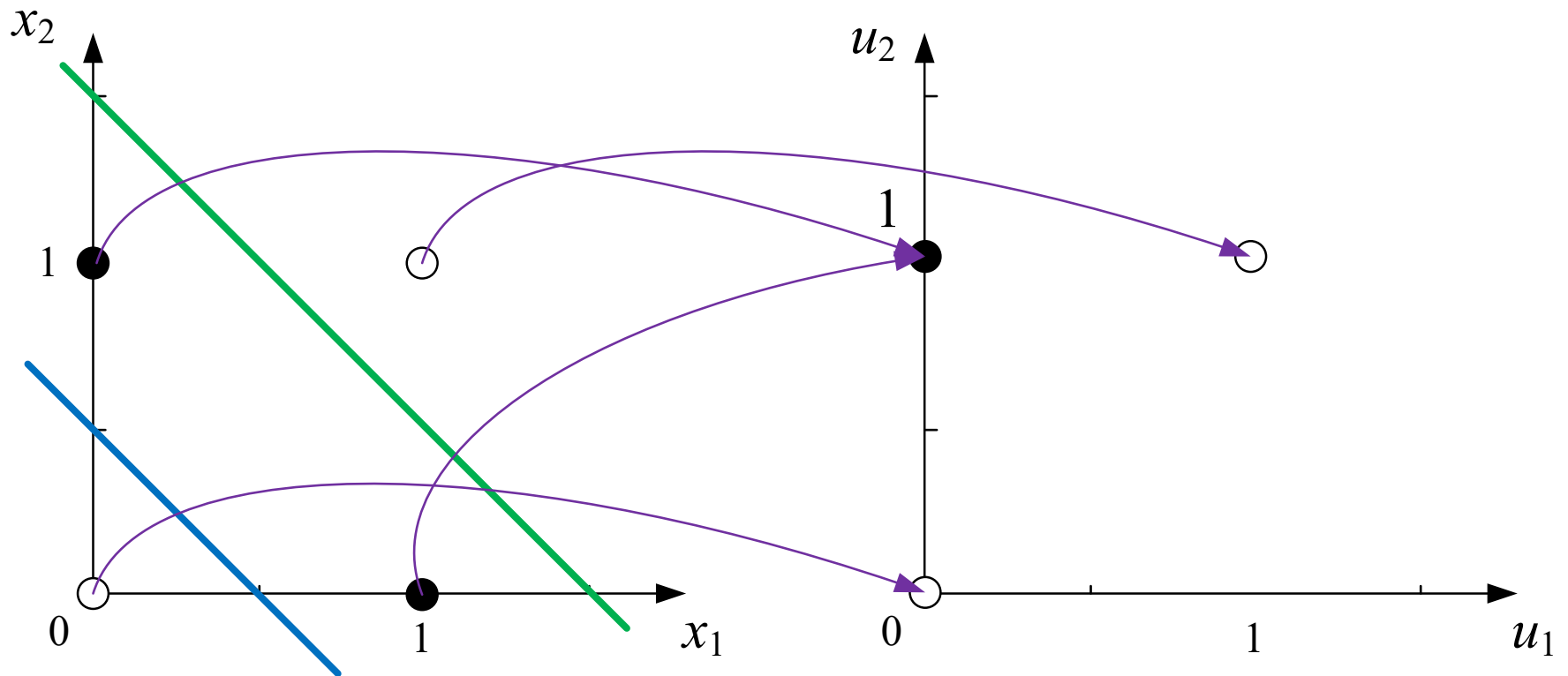
Пример XOR

$$-1.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$u_1 = f(-1.5 + x_1 + x_2)$$

$$-0.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$u_2 = f(-0.5 + x_1 + x_2)$$

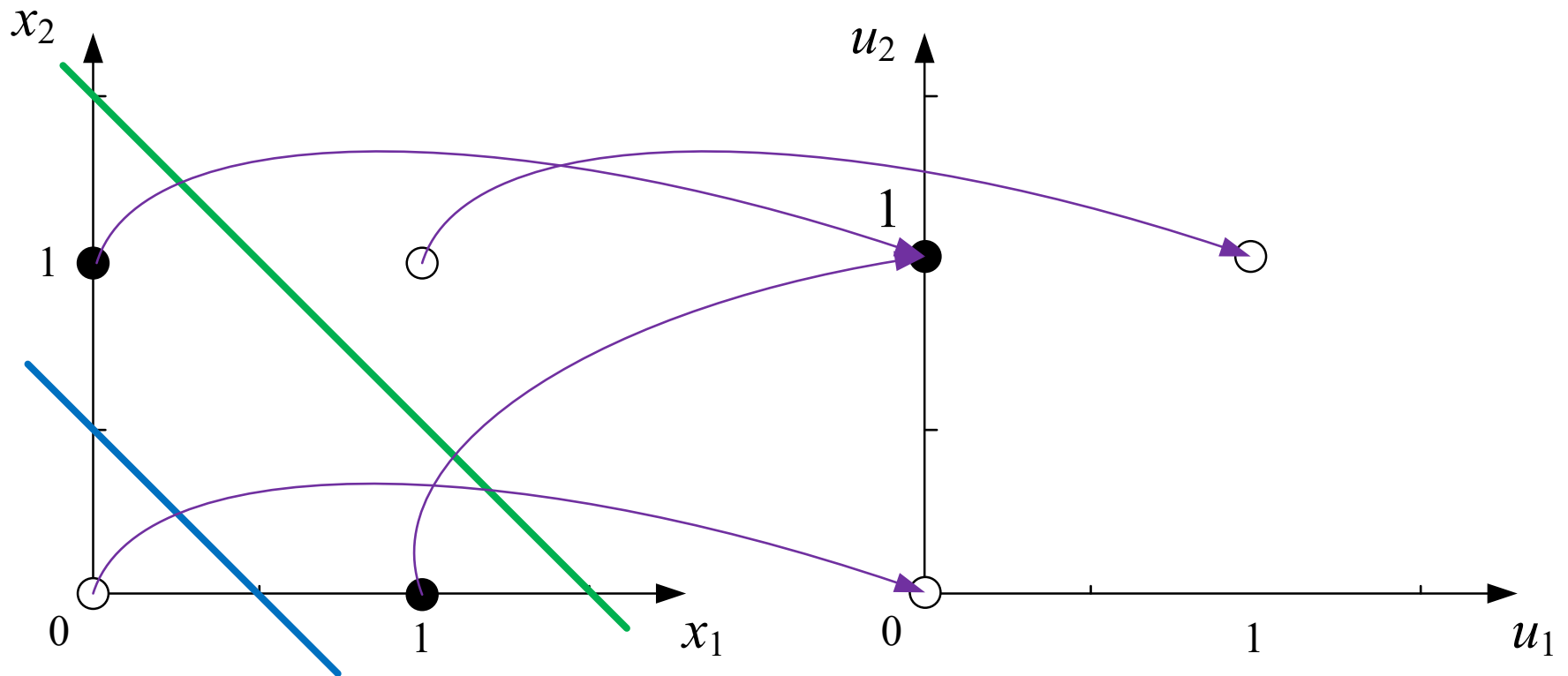


Пример XOR

$$-1.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$-0.5 - u_1 + u_2 = 0$$

$$-0.5 + x_1 + x_2 = 0$$

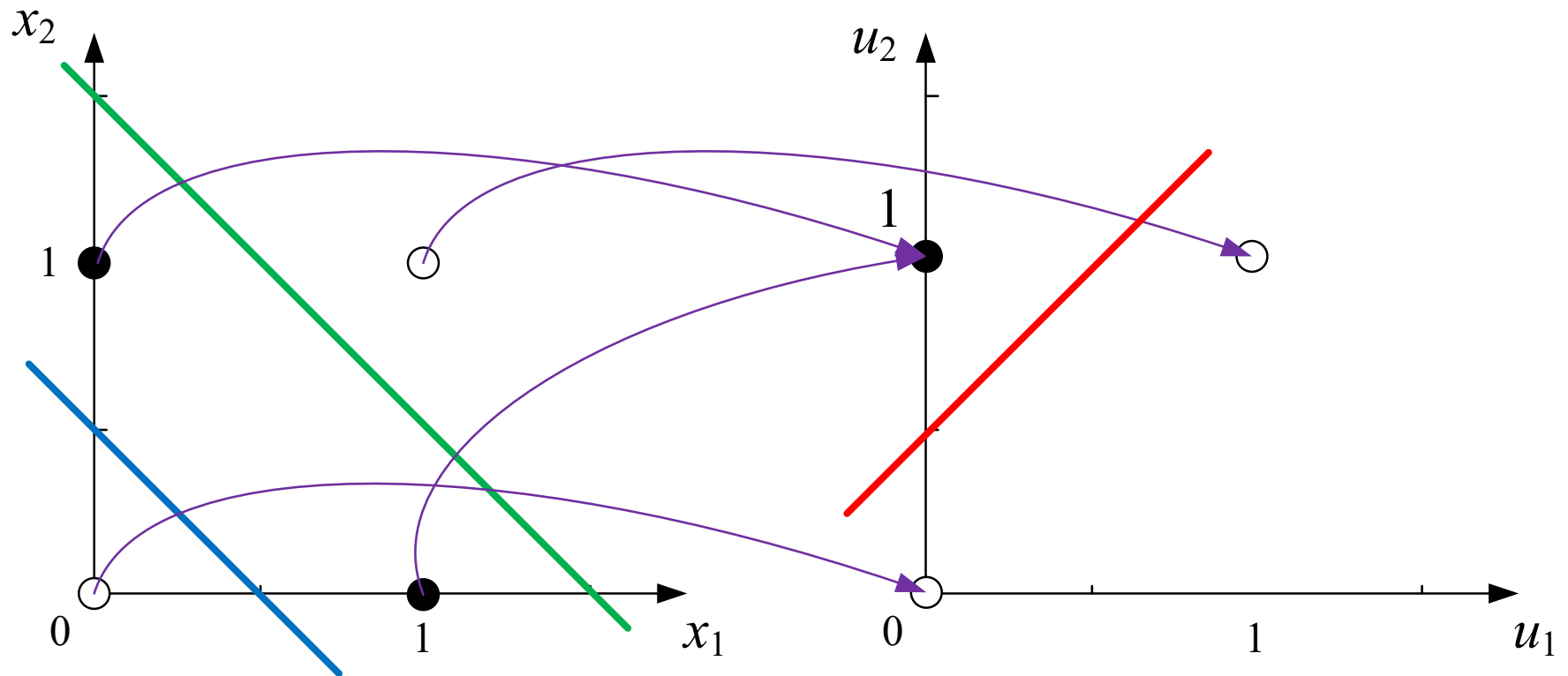


Пример XOR

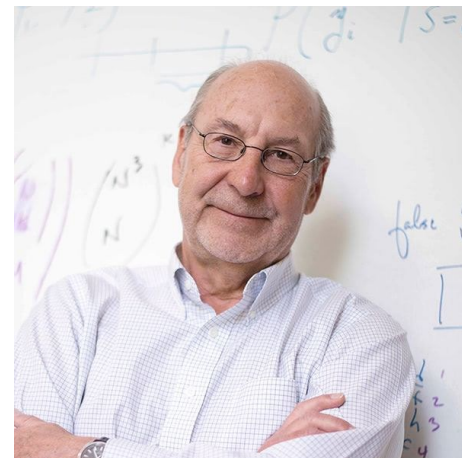
$$-1.5 + x_1 + x_2 = 0$$

$$-0.5 - u_1 + u_2 = 0$$

$$-0.5 + x_1 + x_2 = 0$$



Возможности персептронов



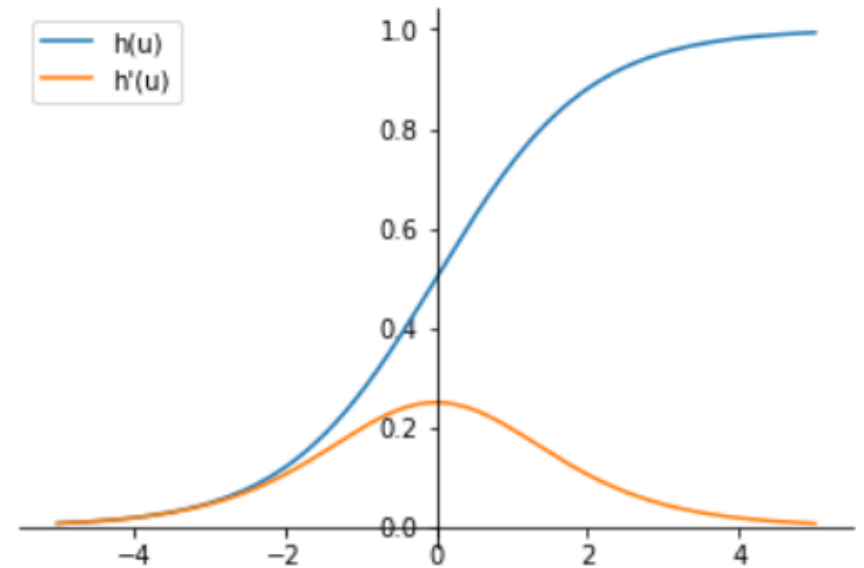
- Однослойный персептрон
– линейно-разделимые данные
- Двухслойный персептрон – любая непрерывная функция
 - *Теорема об универсальной аппроксимации* (George Cybenko, 1989) – нейронная сеть прямого распространения с одним скрытым слоем и сигмоидальной функцией активации может аппроксимировать любую непрерывную функцию многих переменных с произвольной точностью
 - Из теоремы не следует, что один слой является оптимальным

Функции активации

1. Логистический сигмоид

$$h(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}}$$

$$\frac{dh}{du} = \frac{d}{du} \left(\frac{1}{1 + e^{-u}} \right) = h(1 - h)$$

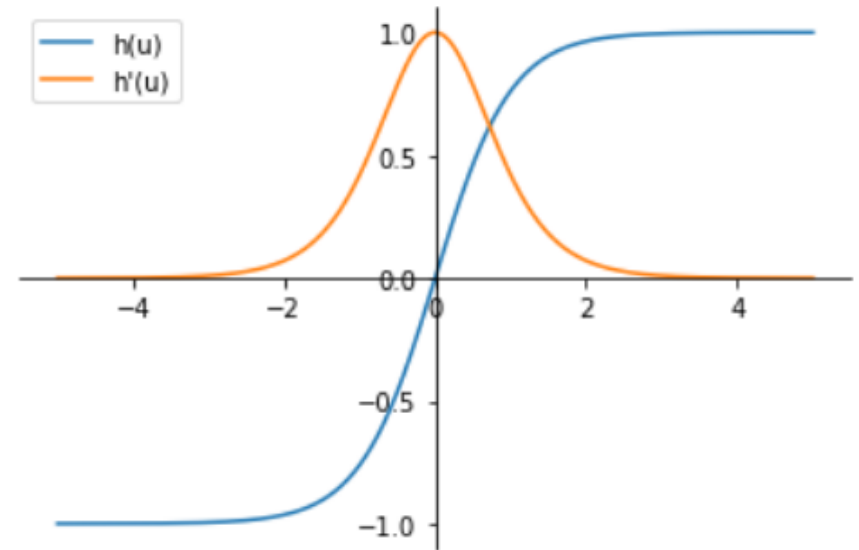


Функции активации

2. Гиперболический тангенс

$$h(u) = \tanh(u) = \frac{e^u - e^{-u}}{e^u + e^{-u}}$$

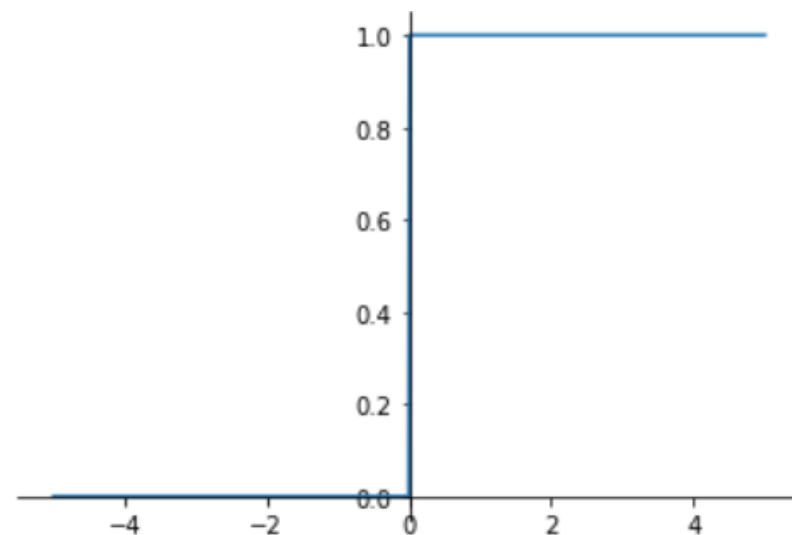
$$\frac{dh}{du} = 1 - \tanh^2(u) = 1 - h^2(u)$$



Функции активации

3. Ступенчатая функция (функция Хевисайда)

$$h(u) = H(u) = \begin{cases} 1, u > 0 \\ 0.5, u = 0 \\ 0, u < 0 \end{cases}$$

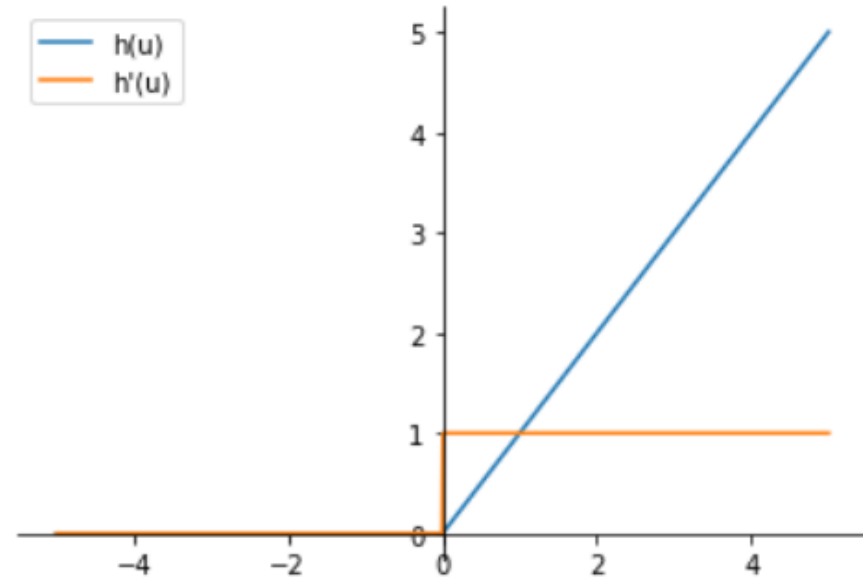


Функции активации

4. Rectified Linear Unit (ReLU)

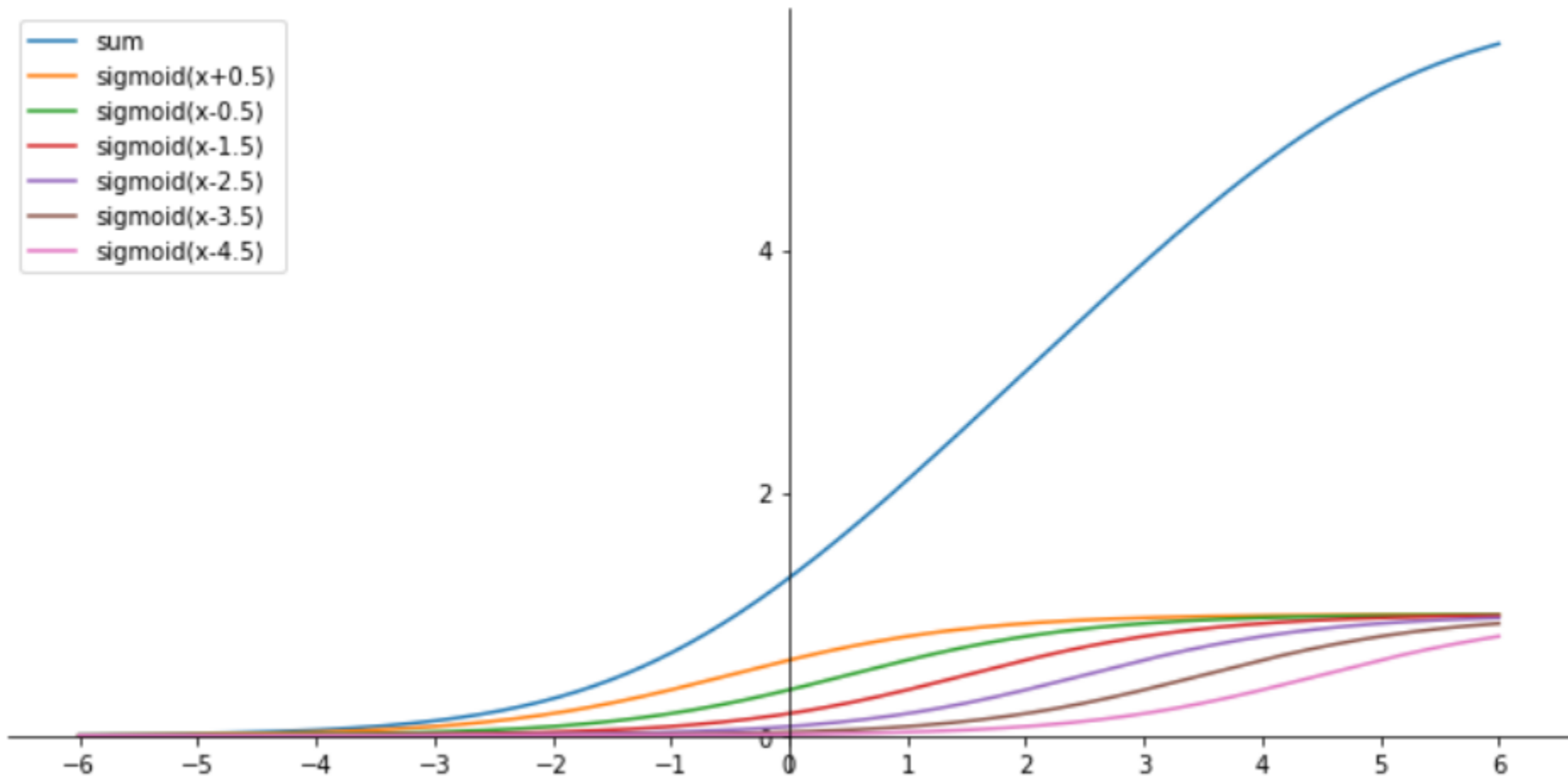
$$h(u) = u^+ = \max(0, u) = \begin{cases} u, & u \geq 0 \\ 0, & u < 0 \end{cases}$$

$$\frac{dh}{du} = H(u) = \begin{cases} 1, & u \geq 0 \\ 0, & u < 0 \end{cases}$$



Функции активации

$$h(u) = \sigma\left(x + \frac{1}{2}\right) + \sigma\left(x - \frac{1}{2}\right) + \sigma\left(x - \frac{3}{2}\right) + \sigma\left(x - \frac{5}{2}\right) + \sigma\left(x - \frac{7}{2}\right) + \dots$$

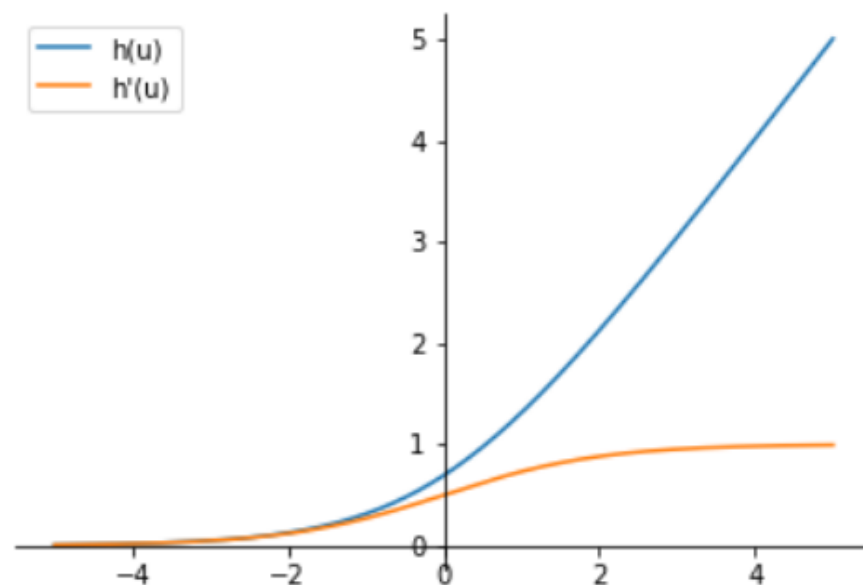


Функции активации

5. Softplus

$$h(u) = \ln(1 + e^u)$$

$$\frac{dh}{du} = \text{sigmoid}(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}}$$

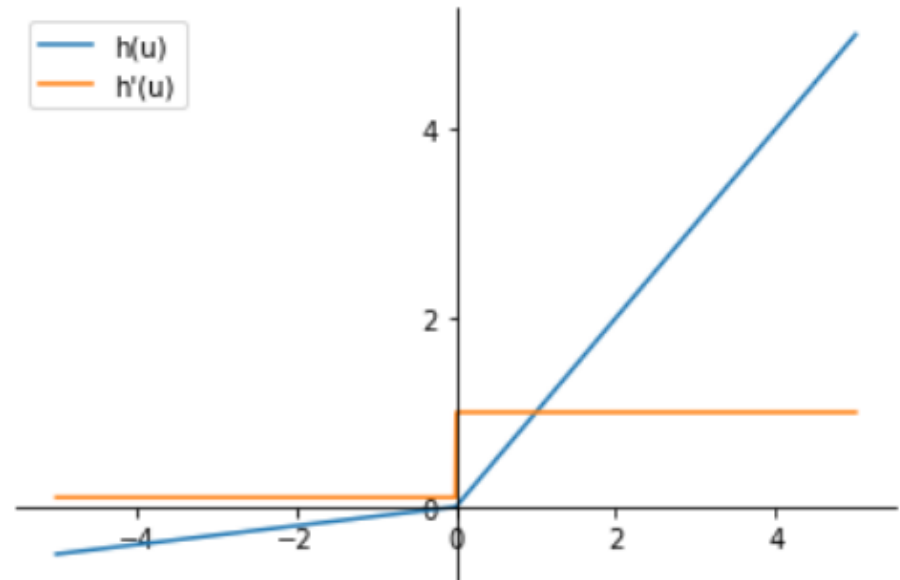


Функции активации

6. Leaky Rectified Linear Unit (LReLU),
Parametric Rectified Linear Unit (PReLU)

$$h(u) = \begin{cases} u, u \geq 0 \\ au, u < 0 \end{cases}$$

$$\frac{dh}{du} = \begin{cases} 1, u \geq 0 \\ a, u < 0 \end{cases}$$

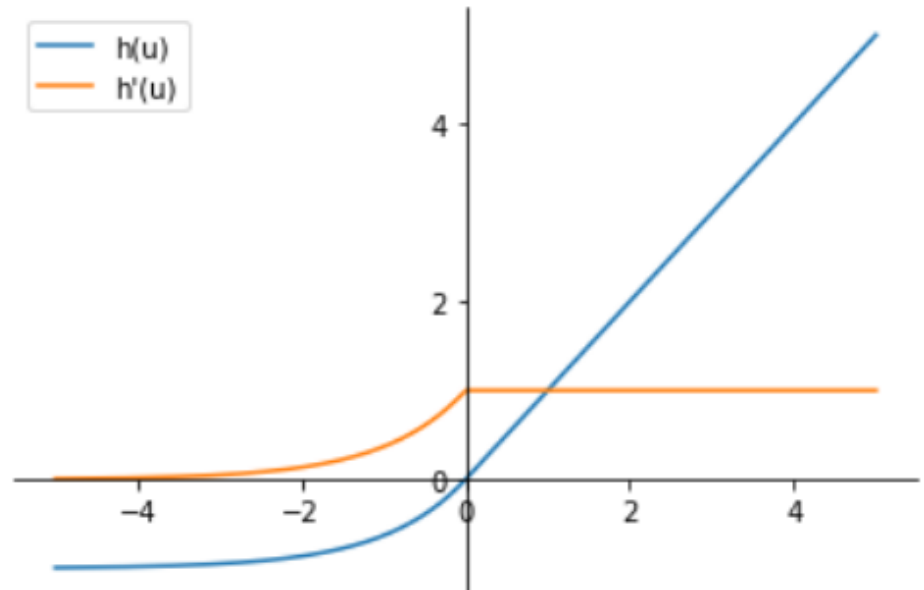


Функции активации

7. Exponential Linear Unit (ELU)

$$h(u) = \begin{cases} u, & u \geq 0 \\ a(e^u - 1), & u < 0 \end{cases}$$

$$\frac{dh}{du} = \begin{cases} 1, & u \geq 0 \\ ae^u, & u < 0 \end{cases}$$

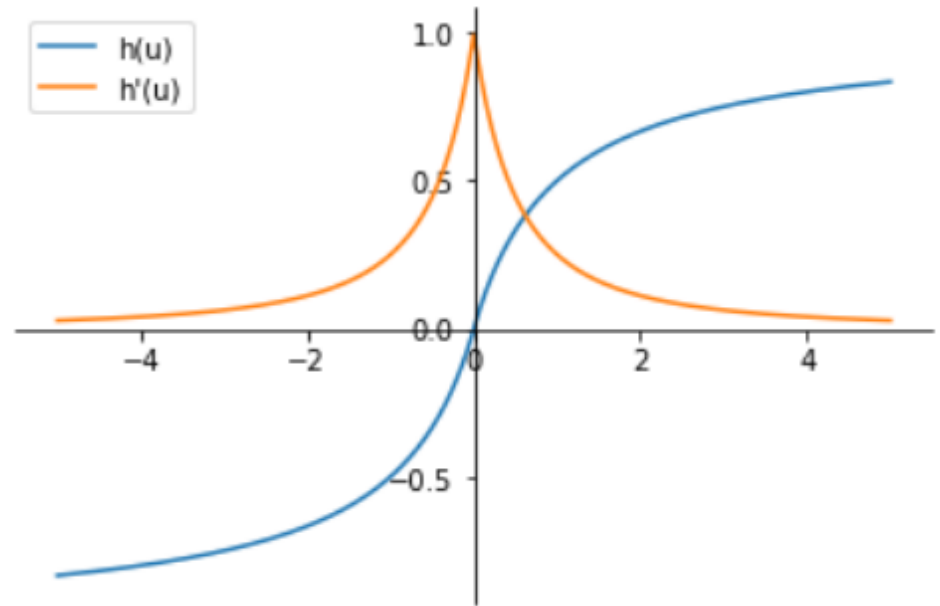


Функции активации

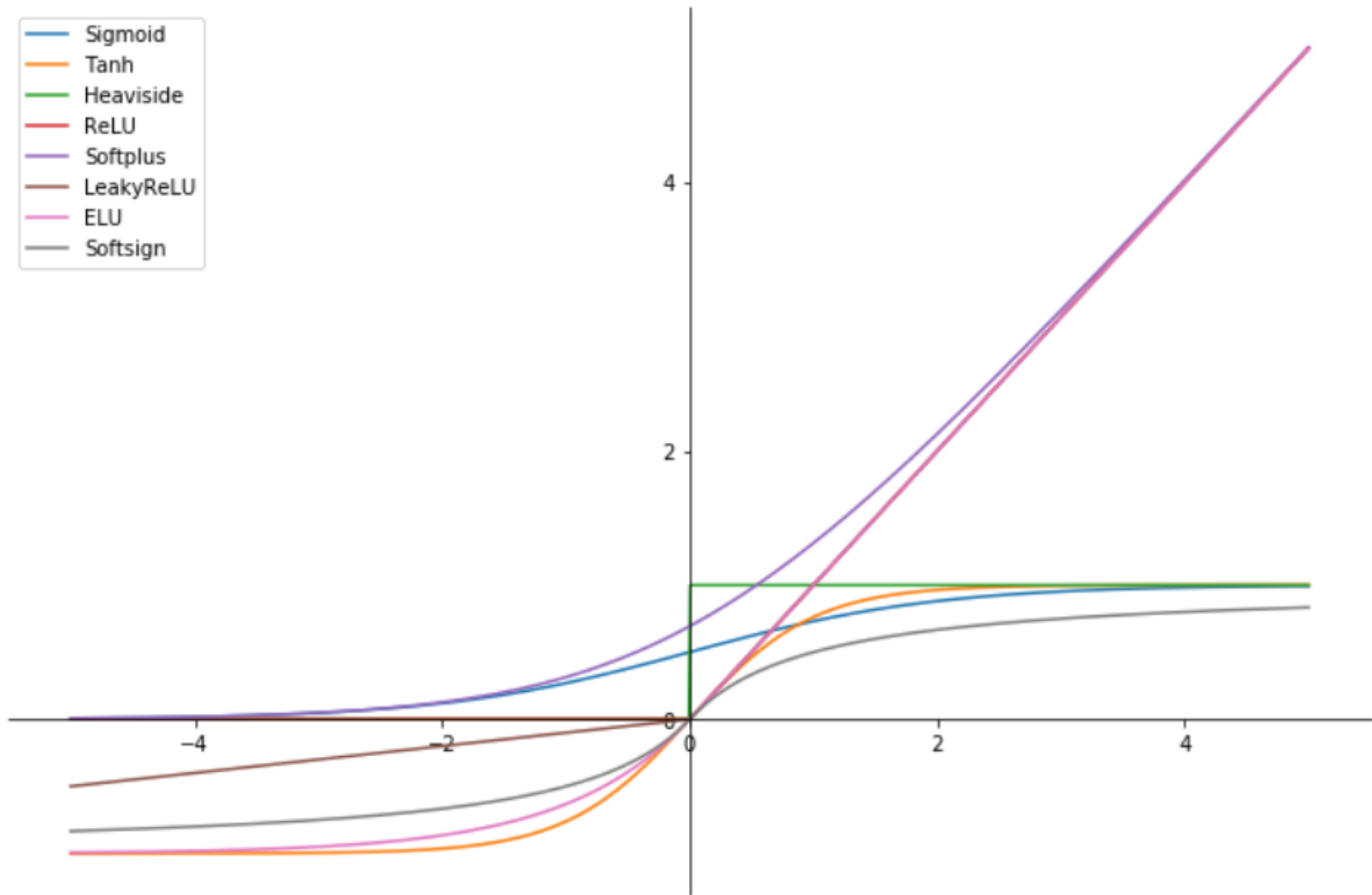
8. SoftSign

$$h(u) = \frac{u}{1 + |u|}$$

$$\frac{dh}{du} = \frac{u}{(1 + |u|)^2}$$



Функции активации



Функции активации

- SoftMax – обобщение логистической функции для многомерного случая:

$$\text{SoftMax}(z_1, \dots, z_K) = \left(\frac{\exp(z_1)}{\sum_{k=1}^K \exp(z_k)}, \dots, \frac{\exp(z_K)}{\sum_{k=1}^K \exp(z_k)} \right)$$

i	z_i	$\exp(z_i)$	p_i
1	5	148.4	0.21
2	3	20.1	0.03
3	6.2	492.7	0.68
4	4	54.6	0.08
5	1.5	4.5	0.01
6	-2	0.1	0.00
		720.5	1.00