

# Теория вероятностей и математическая статистика

Дисперсия. Функция распределения. Распределения Бернулли и биномиальное.

Глеб Карпов

ВШБ Бизнес-информатика

## Характеристики С.В.: Дисперсия

- Дисперсия случайной величины - это число, **константа**, которое помогает нам понять степень разброса потенциальных значений случайной величины относительно среднего.

## Характеристики С.В.: Дисперсия

- Дисперсия случайной величины - это число, **константа**, которое помогает нам понять степень разброса потенциальных значений случайной величины относительно среднего.
- Для случайной величины  $X$  её дисперсия обозначается  $Var[X]$  (Variance) и определяется как:

$$Var[X] = E[(X - E[X])^2]$$

## Характеристики С.В.: Дисперсия

- Дисперсия случайной величины - это число, **константа**, которое помогает нам понять степень разброса потенциальных значений случайной величины относительно среднего.
- Для случайной величины  $X$  её дисперсия обозначается  $Var[X]$  (Variance) и определяется как:

$$Var[X] = E[(X - E[X])^2]$$

- Формально говоря, дисперсия это математическое ожидание новой случайной величины:

$$Y = g(X) = (X - E[X])^2,$$

описывающей квадрат расстояния между значением случайной величины  $X$  и её математическим ожиданием.

## Характеристики С.В.: Дисперсия

- Дисперсия случайной величины - это число, **константа**, которое помогает нам понять степень разброса потенциальных значений случайной величины относительно среднего.
- Для случайной величины  $X$  её дисперсия обозначается  $Var[X]$  (Variance) и определяется как:

$$Var[X] = E[(X - E[X])^2]$$

- Формально говоря, дисперсия это математическое ожидание новой случайной величины:

$$Y = g(X) = (X - E[X])^2,$$

описывающей квадрат расстояния между значением случайной величины  $X$  и её математическим ожиданием.

- Также вводится понятие стандартного отклонения (standard deviation, std) величины  $X$ , которое является квадратным корнем из дисперсии:  $std[X] = \sqrt{Var[X]}$ .

## Характеристики С.В.: Дисперсия



### Вычисление дисперсии

Существует упрощенная формула:

$$\begin{aligned} E[(X - E[X])^2] &= E[X^2 - 2XE[X] + (E[X])^2] = \\ &= E[X^2] - E[2E[X]X] + E[(E[X])^2] = E[X^2] - 2E[X]E[X] + (E[X])^2 = \\ &\boxed{E[X^2] - (E[X])^2} \end{aligned}$$

В процессе мы используем свойство линейности математического ожидания, а также знание того, что  $E[X]$  - это константа, при этом  $E[c] = c$ , то есть  $E[E[X]] = E[X]$ .

## Свойства дисперсии

1. **Неотрицательность:** Для любой случайной величины  $X$ :

$$Var[X] \geq 0$$

2. **Дисперсия константы:** Если  $c$  - константа, то:

$$Var[c] = 0$$

3. **Масштабирование:** Для любой константы  $c$ :

$$Var[cX] = c^2 Var[X]$$

## Дисперсия: пример 1

Посчитаем дисперсию на примере нашей задачи. Считаем уже известным, что  $E[X] = 1.2$ .

$x$	0	-1	-2	1	2	3
$p_X(x)$	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3

- Нам нужно вычислить  $E[Y]$ , где  $Y = (X - E[X])^2$ . Сразу воспользуемся подходом, позволяющим миновать шаг построения таблицы вероятности для  $Y$ :

$$\begin{aligned}E[Y] &= \sum_{i=1}^6 g(x_i)P_X(X = x_i) = \sum_{i=1}^6 (x_i - 1.2)^2 P_X(X = x_i) = \\&= 1.44 \cdot 0.1 + 4.84 \cdot 0.1 + 10.24 \cdot 0.1 + 0.04 \cdot 0.2 + 0.64 \cdot 0.2 + 3.24 \cdot 0.3 = 2.76\end{aligned}$$

- Но для дисперсии у нас есть ещё более умный подход, описанный на одном из слайдов выше:

$$Var[X] = E[X^2] - (E[X])^2 = 4.2 - (1.2)^2 = 2.76$$

$$E[X^2] = \sum_{i=1}^6 (x_i)^2 P_X(X = x_i) = 0.1 + 4 \cdot 0.1 + 1 \cdot 0.2 + 4 \cdot 0.2 + 9 \cdot 0.3 = 4.2$$

- Voilà!

## Дисперсия: пример 2

Предположим, у нас есть другая случайная величина  $W$  и ее функция вероятности задана:

$w$	-6	0	1	15
$p_W(x)$	0.1	0.5	0.3	0.1

- Посчитаем математическое ожидание:

$$E[W] = -6 \cdot 0.1 + 0 + 1 \cdot 0.3 + 15 \cdot 0.1 = 1.2 = E[X] \text{ из предыдущего примера}$$

## Дисперсия: пример 2

Предположим, у нас есть другая случайная величина  $W$  и ее функция вероятности задана:

$w$	-6	0	1	15
$p_W(x)$	0.1	0.5	0.3	0.1

- Посчитаем математическое ожидание:

$$E[W] = -6 \cdot 0.1 + 0 + 1 \cdot 0.3 + 15 \cdot 0.1 = 1.2 = E[X] \text{ из предыдущего примера}$$

- Посчитаем дисперсию для  $W$ :

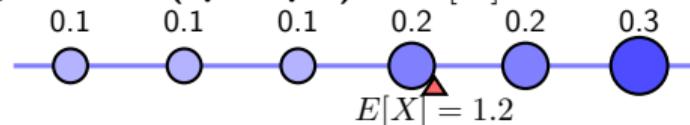
$$Var[W] = E[W^2] - (E[W])^2 = 26.4 - (1.2)^2 = 24.96$$

$$E[W^2] = \sum_{i=1}^4 (w_i)^2 \cdot P_W(W = w_i) = 36 \cdot 0.1 + 0 + 1 \cdot 0.3 + 225 \cdot 0.1 = 26.4$$

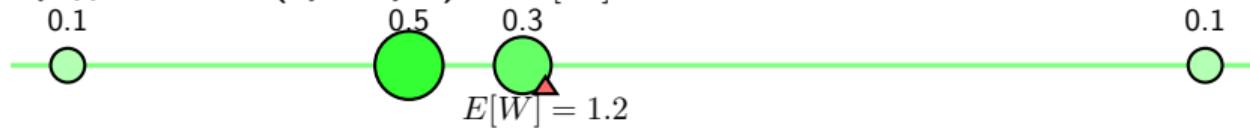
## Физическая интерпретация дисперсии

Дисперсия показывает, насколько “разбросаны” значения относительно среднего. Представим случайные величины как массы на стержне:

**Распределение X (пример 1):**  $Var[X] = 2.76$



**Распределение W (пример 2):**  $Var[W] = 24.96$



Масштаб не соблюден - для наглядности



## Функция распределения (кумулятивная/интегральная)

- Функция распределения (кумулятивная/интегральная) (CDF) случайной величины  $X$  определяется как:

$$F_X(x) = P(X \leq x), \quad F_X(x) : \mathbb{R} \longrightarrow [0, 1] \subset \mathbb{R}$$

Для дискретной случайной величины:

$$F_X(x) = \sum_{i: x_i \leq x} P_X(X = x_i)$$

## Функция распределения (кумулятивная/интегральная)

- Функция распределения (кумулятивная/интегральная) (CDF) случайной величины  $X$  определяется как:

$$F_X(x) = P(X \leq x), \quad F_X(x) : \mathbb{R} \longrightarrow [0, 1] \subset \mathbb{R}$$

Для дискретной случайной величины:

$$F_X(x) = \sum_{i: x_i \leq x} P_X(X = x_i)$$

- $F_X(x)$  показывает вероятность того, что случайная величина  $X$  примет значение, не превышающее  $x$ . Иными словами, сколько вероятности “скопилось”, аккумулировалось, до значения  $x$ .

## Свойства CDF для дискретных случайных величин

1. Монотонность:  $F_X(x)$  неубывающая функция
2. Границные значения:
  - $\lim_{x \rightarrow -\infty} F_X(x) = 0$
  - $\lim_{x \rightarrow +\infty} F_X(x) = 1$
3. Ступенчатая функция: CDF дискретной с.в. имеет скачки в точках, где  $p_X(x) > 0$

## Пример 1: CDF для распределения X

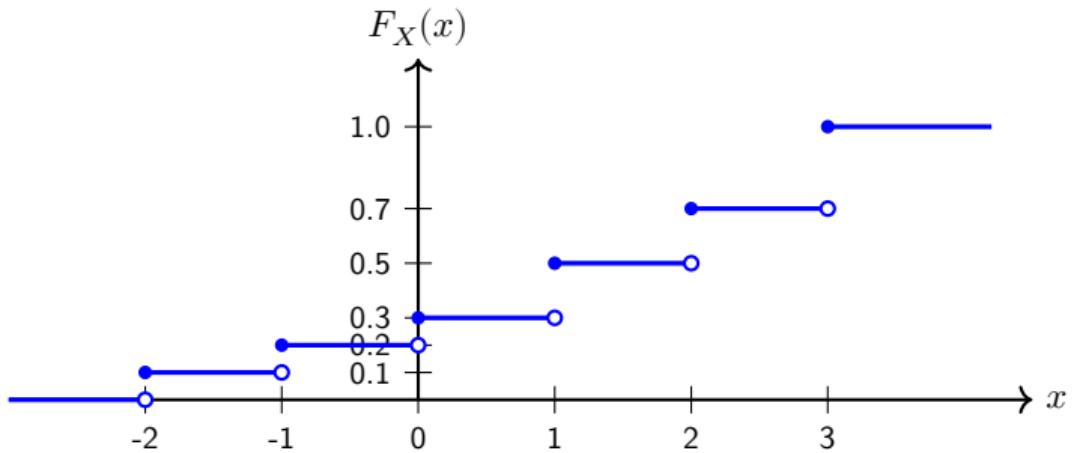
Вспомним наше первое распределение:

$x$	0	-1	-2	1	2	3
$p_X(x)$	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3

Вычислим CDF:

1.  $F_X(x) = 0$  при  $x < -2$
2.  $F_X(x) = 0.1$  при  $-2 \leq x < -1$
3.  $F_X(x) = 0.2$  при  $-1 \leq x < 0$
4.  $F_X(x) = 0.3$  при  $0 \leq x < 1$
5.  $F_X(x) = 0.5$  при  $1 \leq x < 2$
6.  $F_X(x) = 0.7$  при  $2 \leq x < 3$
7.  $F_X(x) = 1.0$  при  $x \geq 3$

## График CDF для распределения X



## Пример 2: CDF для распределения W

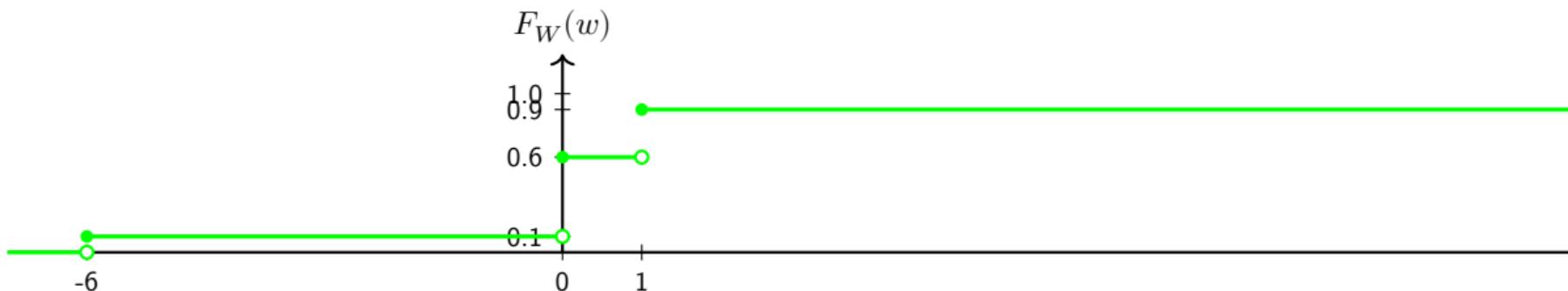
Теперь для второго распределения:

$w$	-6	0	1	15
$p_W(w)$	0.1	0.5	0.3	0.1

Вычислим CDF:

1.  $F_W(w) = 0$  при  $w < -6$
2.  $F_W(w) = 0.1$  при  $-6 \leq w < 0$
3.  $F_W(w) = 0.6$  при  $0 \leq w < 1$
4.  $F_W(w) = 0.9$  при  $1 \leq w < 15$
5.  $F_W(w) = 1.0$  при  $w \geq 15$

## График CDF для распределения W



## Использование CDF для вычисления вероятностей

CDF позволяет легко вычислять вероятности попадания в интервалы:



### Формулы для вычисления вероятностей

1.  $P(X \leq a) = F_X(a)$
2.  $P(X < a) = F_X(a^-) = \lim_{x \rightarrow a^-} F_X(x)$
3.  $P(X > a) = 1 - F_X(a)$
4.  $P(X \geq a) = 1 - F_X(a^-)$
5.  $P(a < X \leq b) = F_X(b) - F_X(a)$
6.  $P(a \leq X \leq b) = F_X(b) - F_X(a^-)$

## Примеры вычислений с CDF

Для распределения  $X$  (на слайдах ранее):

1.  $P(X \leq 1) = F_X(1) = 0.5$
2.  $P(X > 2) = 1 - F_X(2) = 1 - 0.7 = 0.3$
3.  $P(-1 < X \leq 2) = F_X(2) - F_X(-1) = 0.7 - 0.2 = 0.5$
4.  $P(0 \leq X < 3) = F_X(3^-) - F_X(0^-) = 0.7 - 0.2 = 0.5$

## Распределение Бернулли

Начнем с простейшего случая - **одного случайного эксперимента** с двумя возможными исходами.

**Распределение Бернулли** - это распределение случайной величины  $X$ , которая принимает только два значения:

$$X = \begin{cases} 1 & \text{с вероятностью } p \text{ ("успех")} \\ 0 & \text{с вероятностью } q = 1 - p \text{ ("неудача")} \end{cases}$$

Обозначается как  $X \sim Bern(p)$ , где  $p \in [0, 1]$  - параметр распределения.

## Характеристики распределения Бернулли

### 💡 Основные характеристики

Для случайной величины  $X \sim Bern(p)$ :

- Математическое ожидание:

$$E[X] = 0 \cdot (1 - p) + 1 \cdot p = p$$

- Дисперсия:

$$Var[X] = E[X^2] - (E[X])^2 = p - p^2 = p(1 - p)$$

- Стандартное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{p(1 - p)}$$

## Примеры распределения Бернулли

- Подбрасывание монеты:** "Орел" = 1, "Решка" = 0,  $p = 0.5$  (для честной монеты)
- Производственный контроль:** "Дефектное изделие" = 1, "Качественное" = 0
- Медицинский тест:** "Положительный результат" = 1, "Отрицательный" = 0
- Маркетинг:** "Покупка товара" = 1, "Отказ от покупки" = 0

## От одного испытания к процессу

- Что если мы хотим провести несколько независимых испытаний Бернулли?
- Например: подбросить монету 10 раз, проверить 100 изделий на дефекты, провести 50 медицинских тестов.
- Это приводит нас к понятию процесса Бернулли - последовательности независимых испытаний Бернулли.

## Процесс Бернулли

**Процесс Бернулли** - это последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , где каждая  $X_i \sim Bern(p)$ :

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{с вероятностью } p \text{ ("успех")} \\ 0 & \text{с вероятностью } 1 - p \text{ ("неудача")} \end{cases}$$

Ключевое отличие от одного испытания: теперь у нас есть **последовательность** результатов.

## Свойства процесса Бернулли

1. **Независимость:** Результат каждого испытания  $X_i$  не зависит от результатов других испытаний
2. **Два исхода:** Каждое испытание может закончиться только успехом (1) или неудачей (0)
3. **Постоянная вероятность:** Вероятность успеха  $p$  не изменяется от испытания к испытанию

## Примеры процесса Бернулли

- 1. Серия подбрасываний монеты:** Последовательность  $(X_1, X_2, \dots, X_{10})$  для 10 подбрасываний
- 2. Контроль качества:** Проверка партии из  $n$  изделий, где каждое может быть дефектным независимо от других
- 3. Клинические испытания:** Тестирование лекарства на  $n$  пациентах, где каждый может показать положительную реакцию

## Биномиальное распределение

- Теперь, когда у нас есть процесс Бернулли, возникает естественный вопрос: “**Сколько успехов мы получим в  $n$  испытаниях?**”

**Биномиальное распределение** описывает количество успехов в  $n$  независимых испытаниях Бернулли с вероятностью успеха  $p$ . Если  $X_1, X_2, \dots, X_n$  - процесс Бернулли с параметром  $p$ , то случайная величина:

$$Y = X_1 + X_2 + \dots + X_n$$

имеет биномиальное распределение и обозначается  $Y \sim Bin(n, p)$ .  $Y$  может принимать значения  $0, 1, 2, \dots, n$  (от 0 до  $n$  успехов).

## Функция вероятности биномиального распределения

Вероятность получить ровно  $k$  успехов в  $n$  испытаниях:

$$P(Y = k) = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k}$$

### 💡 Интуиция формулы

- $p^k$  - вероятность  $k$  успехов
- $(1 - p)^{n-k}$  - вероятность  $(n - k)$  неудач
- $C_n^k$  - количество способов выбрать  $k$  позиций из  $n$  для размещения успехов

## Характеристики биномиального распределения



### Основные характеристики

Для случайной величины  $Y \sim Bin(n, p)$ :

**Математическое ожидание:**

$$E[Y] = np$$

**Дисперсия:**

$$Var[Y] = np(1 - p)$$

**Стандартное отклонение:**

$$\sigma = \sqrt{np(1 - p)}$$

**Вывод математического ожидания:**

$$E[Y] = E[X_1 + X_2 + \dots + X_n] = E[X_1] + E[X_2] + \dots + E[X_n] = p + p + \dots + p = np$$

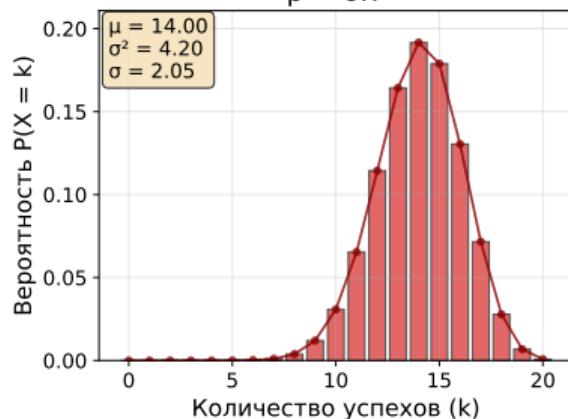
## Визуализация биномиального распределения

Форма биномиального распределения зависит от параметров  $n$  и  $p$ . Рассмотрим, как влияет значение  $p$  на распределение при фиксированном  $n = 20$ :

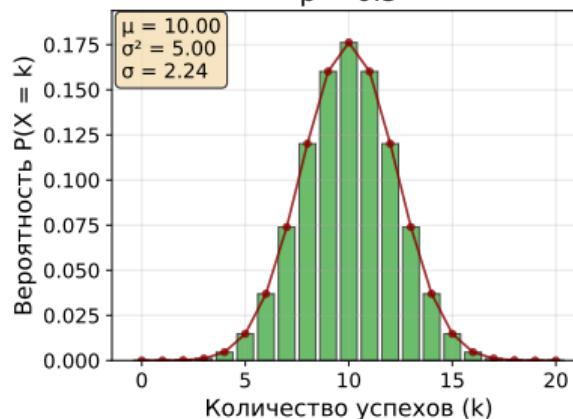
### Сравнение различных значений $p$

Функция вероятности биномиального распределения  
 $n = 20$  испытаний

$p > 0.5$  (смещение вправо)  
 $p = 0.7$



$p = 0.5$  (симметричное)  
 $p = 0.5$



$p < 0.5$  (смещение влево)  
 $p = 0.3$

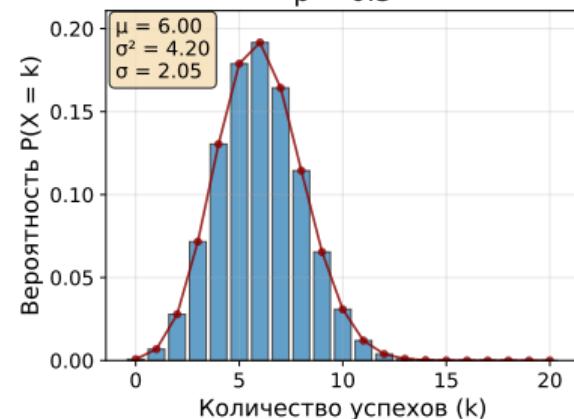


Рис. 1: Сравнение биномиального распределения для разных значений  $p$

## Визуализация биномиального распределения

### Наблюдения

**$p < 0.5$**  (например,  $p = 0.3$ ): Распределение смещено влево, большинство значений сосредоточено в области малых  $k$

**$p = 0.5$** : Распределение симметрично относительно среднего значения

**$p > 0.5$**  (например,  $p = 0.7$ ): Распределение смещено вправо, большинство значений сосредоточено в области больших  $k$

## Пример: подбрасывание монеты

Подбросим честную монету 10 раз. Какова вероятность получить ровно 6 орлов?

- $n = 10, p = 0.5, k = 6, Y \sim Bin(10, 0.5)$

$$P(Y = 6) = C_{10}^6 (0.5)^6 (0.5)^4 = \frac{10!}{6! \cdot 4!} (0.5)^{10}$$

$$= \frac{10 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 7}{4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1} \cdot \frac{1}{1024} = 210 \cdot \frac{1}{1024} \approx 0.205$$

**Ожидаемое количество орлов:**  $E[Y] = 10 \cdot 0.5 = 5$

## Пример: контроль качества

На заводе производят детали, 3% из которых бракованные. Проверяют партию из 100 деталей.

- $n = 100, p = 0.03$  (вероятность брака)

**Характеристики:**

- $E[Y] = 100 \cdot 0.03 = 3$  (ожидаем 3 бракованные детали)
- $Var[Y] = 100 \cdot 0.03 \cdot 0.97 = 2.91$
- $\sigma = \sqrt{2.91} \approx 1.71$

**Вероятность не найти ни одной бракованной детали:**

$$P(Y = 0) = C_{100}^0 (0.03)^0 (0.97)^{100} = (0.97)^{100} \approx 0.048$$

## Пример: контроль качества

На заводе производят детали, 3% из которых бракованные. Проверяют партию из 100 деталей.

- $n = 100, p = 0.03$  (вероятность брака)
- $Y \sim Bin(100, 0.03)$  - количество бракованных деталей

**Характеристики:**

- $E[Y] = 100 \cdot 0.03 = 3$  (ожидаем 3 бракованные детали)
- $Var[Y] = 100 \cdot 0.03 \cdot 0.97 = 2.91$
- $\sigma = \sqrt{2.91} \approx 1.71$

**Вероятность не найти ни одной бракованной детали:**

$$P(Y = 0) = C_{100}^0 (0.03)^0 (0.97)^{100} = (0.97)^{100} \approx 0.048$$

## Применения биномиального распределения

1. **Медицина:** Количество пациентов, для которых лекарство окажется эффективным
2. **Маркетинг:** Количество покупателей, совершивших покупку после просмотра рекламы
3. **Социология:** Количество респондентов, давших положительный ответ в опросе
4. **Спорт:** Количество побед команды в серии матчей