

# Теория Вероятностей и Статистика

## Гипотезы о распределении и независимости

Потанин Богдан Станиславович

старший преподаватель, научный сотрудник, кандидат экономических наук

2022-2023

# Тест Колмогорова

## Формулировка

- Рассмотрим выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из распределения  $D_X$  с непрерывной функцией распределения  $F_{D_X}(t)$ . Также, рассмотрим вариационный ряд  $X_{(1)}, \dots, X_{(n)}$ .

# Тест Колмогорова

## Формулировка

- Рассмотрим выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из распределения  $D_X$  с непрерывной функцией распределения  $F_{D_X}(t)$ . Также, рассмотрим вариационный ряд  $X_{(1)}, \dots, X_{(n)}$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : D_X = D_0$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sqrt{n}d_n = \sqrt{n} \left( \sup_{t \in R} |\hat{F}_n(t) - F_{D_0}(t)| \right) \approx \sqrt{n} \left( \max_{t \in R} |\hat{F}_n(t) - F_{D_0}(t)| \right), \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \mathcal{K}(n)$$

Где выборочная функция распределения  $\hat{F}_n(t)$  считается по выборке  $X$ .

# Тест Колмогорова

## Формулировка

- Рассмотрим выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из распределения  $D_X$  с непрерывной функцией распределения  $F_{D_X}(t)$ . Также, рассмотрим вариационный ряд  $X_{(1)}, \dots, X_{(n)}$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : D_X = D_0$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sqrt{n}d_n = \sqrt{n} \left( \sup_{t \in R} |\hat{F}_n(t) - F_{D_0}(t)| \right) \approx \sqrt{n} \left( \max_{t \in R} |\hat{F}_n(t) - F_{D_0}(t)| \right), \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \mathcal{K}(n)$$

Где выборочная функция распределения  $\hat{F}_n(t)$  считается по выборке  $X$ .

- Критическая область является правосторонней  $\mathcal{T}_\alpha = (\mathcal{K}_n^{1-\alpha}, \infty)$ , где  $\mathcal{K}_n^{1-\alpha}$  – квантиль уровня  $1 - \alpha$  распределения Колмогорова. В результате  $p\text{-value} = 1 - F_{\mathcal{K}(n)}(T(x))$ .

# Тест Колмогорова

## Формулировка

- Рассмотрим выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из распределения  $D_X$  с непрерывной функцией распределения  $F_{D_X}(t)$ . Также, рассмотрим вариационный ряд  $X_{(1)}, \dots, X_{(n)}$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : D_X = D_0$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sqrt{n}d_n = \sqrt{n} \left( \sup_{t \in R} |\hat{F}_n(t) - F_{D_0}(t)| \right) \approx \sqrt{n} \left( \max_{t \in R} |\hat{F}_n(t) - F_{D_0}(t)| \right), \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \mathcal{K}(n)$$

Где выборочная функция распределения  $\hat{F}_n(t)$  считается по выборке  $X$ .

- Критическая область является правосторонней  $\mathcal{T}_\alpha = (\mathcal{K}_n^{1-\alpha}, \infty)$ , где  $\mathcal{K}_n^{1-\alpha}$  – квантиль уровня  $1 - \alpha$  распределения Колмогорова. В результате  $p\text{-value} = 1 - F_{\mathcal{K}(n)}(T(x))$ .
- Поиск супремума фактически предполагает нахождение наибольшей разности между предполагаемой (в соответствии с нулевой гипотезой) и выборочной функцией распределения, что нетрудно сделать с помощью двух вспомогательных статистик:

$$d_n = \max(d_n^+, d_n^-)$$

# Тест Колмогорова

## Формулировка

- Рассмотрим выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из распределения  $D_X$  с непрерывной функцией распределения  $F_{D_X}(t)$ . Также, рассмотрим вариационный ряд  $X_{(1)}, \dots, X_{(n)}$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : D_X = D_0$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sqrt{n}d_n = \sqrt{n} \left( \sup_{t \in R} |\hat{F}_n(t) - F_{D_0}(t)| \right) \approx \sqrt{n} \left( \max_{t \in R} |\hat{F}_n(t) - F_{D_0}(t)| \right), \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \mathcal{K}(n)$$

Где выборочная функция распределения  $\hat{F}_n(t)$  считается по выборке  $X$ .

- Критическая область является правосторонней  $\mathcal{T}_\alpha = (\mathcal{K}_n^{1-\alpha}, \infty)$ , где  $\mathcal{K}_n^{1-\alpha}$  – квантиль уровня  $1 - \alpha$  распределения Колмогорова. В результате  $p\text{-value} = 1 - F_{\mathcal{K}(n)}(T(x))$ .
- Поиск супремума фактически предполагает нахождение наибольшей разности между предполагаемой (в соответствии с нулевой гипотезой) и выборочной функцией распределения, что нетрудно сделать с помощью двух вспомогательных статистик:

$$d_n = \max(d_n^+, d_n^-)$$
$$d_n^+ = \max \left( \left| \frac{1}{n} - F_{D_0}(X_{(1)}) \right|, \left| \frac{2}{n} - F_{D_0}(X_{(2)}) \right|, \dots, \left| \frac{n}{n} - F_{D_0}(X_{(n)}) \right| \right)$$

# Тест Колмогорова

## Формулировка

- Рассмотрим выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из распределения  $D_X$  с непрерывной функцией распределения  $F_{D_X}(t)$ . Также, рассмотрим вариационный ряд  $X_{(1)}, \dots, X_{(n)}$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : D_X = D_0$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sqrt{n}d_n = \sqrt{n} \left( \sup_{t \in R} |\hat{F}_n(t) - F_{D_0}(t)| \right) \approx \sqrt{n} \left( \max_{t \in R} |\hat{F}_n(t) - F_{D_0}(t)| \right), \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \mathcal{K}(n)$$

Где выборочная функция распределения  $\hat{F}_n(t)$  считается по выборке  $X$ .

- Критическая область является правосторонней  $\mathcal{T}_\alpha = (\mathcal{K}_n^{1-\alpha}, \infty)$ , где  $\mathcal{K}_n^{1-\alpha}$  – квантиль уровня  $1 - \alpha$  распределения Колмогорова. В результате  $p\text{-value} = 1 - F_{\mathcal{K}(n)}(T(x))$ .
- Поиск супремума фактически предполагает нахождение наибольшей разности между предполагаемой (в соответствии с нулевой гипотезой) и выборочной функцией распределения, что нетрудно сделать с помощью двух вспомогательных статистик:

$$d_n = \max(d_n^+, d_n^-)$$

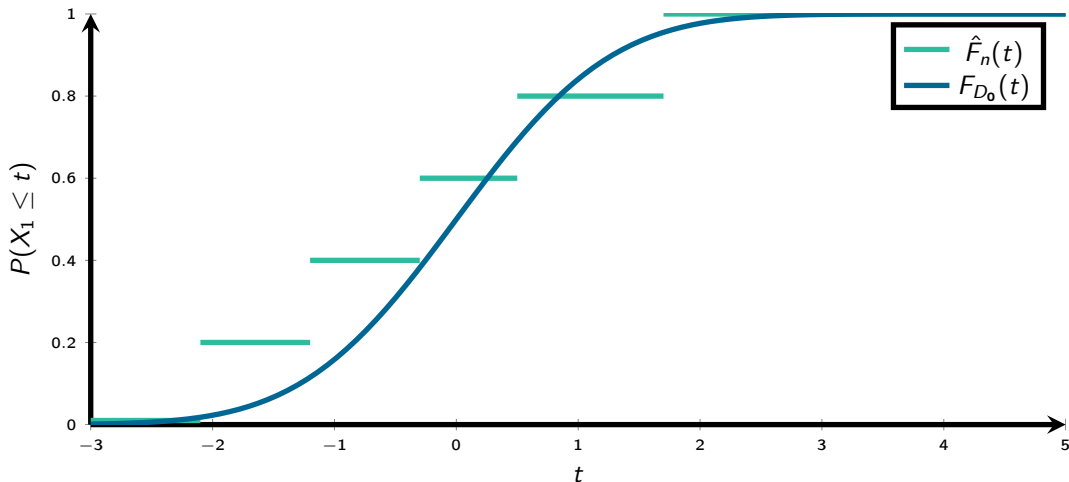
$$d_n^+ = \max \left( \left| \frac{1}{n} - F_{D_0}(X_{(1)}) \right|, \left| \frac{2}{n} - F_{D_0}(X_{(2)}) \right|, \dots, \left| \frac{n}{n} - F_{D_0}(X_{(n)}) \right| \right)$$

$$d_n^- = \max \left( \left| F_{D_0}(X_{(1)}) - \frac{1-1}{n} \right|, \left| F_{D_0}(X_{(2)}) - \frac{2-1}{n} \right|, \dots, \left| F_{D_0}(X_{(n)}) - \frac{n-1}{n} \right| \right)$$

# Тест Колмогорова

## Графическая интерпретация

- Тестовая статистика пропорциональна наибольшему расстоянию между графиками. Смысл расчета  $d_n^+$  и  $d_n^-$  заключается в том, что наибольшее расстояние имеет смысл искать лишь около точек разрыва выборочной функции распределения.





# Тест Колмогорова

## Пример

Имеется реализация выборки  $x = (2, -1, 0)$ . На 10%-м уровне значимости протестируем гипотезу  $H_0 : X_1 \sim \mathcal{N}(0, 1)$ . Отметим, что объем данной выборки слишком мал для того, чтобы асимптотическое распределение статистики было достаточно близко к истинному, однако, малая выборка рассматривается из соображений снижения вычислительной нагрузки.

# Тест Колмогорова

## Пример

Имеется реализация выборки  $x = (2, -1, 0)$ . На 10%-м уровне значимости протестируем гипотезу  $H_0 : X_1 \sim \mathcal{N}(0, 1)$ . Отметим, что объем данной выборки слишком мал для того, чтобы асимптотическое распределение статистики было достаточно близко к истинному, однако, малая выборка рассматривается из соображений снижения вычислительной нагрузки.

- Для удобства запишем реализацию вариационного ряда  $(-1, 0, 2)$  и рассчитаем тестовую статистику:

# Тест Колмогорова

## Пример

Имеется реализация выборки  $x = (2, -1, 0)$ . На 10%-м уровне значимости протестируем гипотезу  $H_0 : X_1 \sim \mathcal{N}(0, 1)$ . Отметим, что объем данной выборки слишком мал для того, чтобы асимптотическое распределение статистики было достаточно близко к истинному, однако, малая выборка рассматривается из соображений снижения вычислительной нагрузки.

- Для удобства запишем реализацию вариационного ряда  $(-1, 0, 2)$  и рассчитаем тестовую статистику:

$$d_n^+(x) = \max(|1/3 - \Phi(-1)|, |2/3 - \Phi(0)|, |3/3 - \Phi(2)|) \approx \max(0.175, 0.167, 0.023) = 0.175$$

# Тест Колмогорова

## Пример

Имеется реализация выборки  $x = (2, -1, 0)$ . На 10%-м уровне значимости протестируем гипотезу  $H_0 : X_1 \sim \mathcal{N}(0, 1)$ . Отметим, что объем данной выборки слишком мал для того, чтобы асимптотическое распределение статистики было достаточно близко к истинному, однако, малая выборка рассматривается из соображений снижения вычислительной нагрузки.

- Для удобства запишем реализацию вариационного ряда  $(-1, 0, 2)$  и рассчитаем тестовую статистику:

$$d_n^+(x) = \max(|1/3 - \Phi(-1)|, |2/3 - \Phi(0)|, |3/3 - \Phi(2)|) \approx \max(0.175, 0.167, 0.023) = 0.175$$

$$d_n^-(x) = \max(|\Phi(-1) - 0/3|, |\Phi(0) - 1/3|, |\Phi(2) - 2/3|) \approx \max(0.159, 0.167, 0.311) = 0.311$$

# Тест Колмогорова

## Пример

Имеется реализация выборки  $x = (2, -1, 0)$ . На 10%-м уровне значимости протестируем гипотезу  $H_0 : X_1 \sim \mathcal{N}(0, 1)$ . Отметим, что объем данной выборки слишком мал для того, чтобы асимптотическое распределение статистики было достаточно близко к истинному, однако, малая выборка рассматривается из соображений снижения вычислительной нагрузки.

- Для удобства запишем реализацию вариационного ряда  $(-1, 0, 2)$  и рассчитаем тестовую статистику:

$$d_n^+(x) = \max(|1/3 - \Phi(-1)|, |2/3 - \Phi(0)|, |3/3 - \Phi(2)|) \approx \max(0.175, 0.167, 0.023) = 0.175$$

$$d_n^-(x) = \max(|\Phi(-1) - 0/3|, |\Phi(0) - 1/3|, |\Phi(2) - 2/3|) \approx \max(0.159, 0.167, 0.311) = 0.311$$

$$T(x) = \sqrt{3}d_n(x) \approx \sqrt{3} \max(0.175, 0.311) = 0.311\sqrt{3} \approx 1.457$$

# Тест Колмогорова

## Пример

Имеется реализация выборки  $x = (2, -1, 0)$ . На 10%-м уровне значимости протестируем гипотезу  $H_0 : X_1 \sim \mathcal{N}(0, 1)$ . Отметим, что объем данной выборки слишком мал для того, чтобы асимптотическое распределение статистики было достаточно близко к истинному, однако, малая выборка рассматривается из соображений снижения вычислительной нагрузки.

- Для удобства запишем реализацию вариационного ряда  $(-1, 0, 2)$  и рассчитаем тестовую статистику:

$$d_n^+(x) = \max(|1/3 - \Phi(-1)|, |2/3 - \Phi(0)|, |3/3 - \Phi(2)|) \approx \max(0.175, 0.167, 0.023) = 0.175$$

$$d_n^-(x) = \max(|\Phi(-1) - 0/3|, |\Phi(0) - 1/3|, |\Phi(2) - 2/3|) \approx \max(0.159, 0.167, 0.311) = 0.311$$

$$T(x) = \sqrt{3}d_n(x) \approx \sqrt{3} \max(0.175, 0.311) = 0.311\sqrt{3} \approx 1.457$$

- Поскольку  $p\text{-value} = 1 - F_{\mathcal{K}(3)}(1.457) \approx 0.857 > 0.1$ , то нулевая гипотеза не отвергается на 10%-м уровне значимости.

# Тест Колмогорова

## Несколько технических примечаний

- Иногда тест Колмогорова также именуют тестом Колмогорова-Смирнова.

# Тест Колмогорова

## Несколько технических примечаний

- Иногда тест Колмогорова также именуют тестом Колмогорова-Смирнова.
- Найти таблицу распределения для распределения Колмогорова крайне сложно. Как правило, вместо таблицы с квантилями распределения Колмогорова, в учебниках и в интернете приводят таблицу критических значений для упрощенного вида тестовой статистики  $T(X) = d_n$ , то есть без  $\sqrt{n}$ . При использовании подобных таблиц следует либо использовать статистику  $T(X) = d_n$ , либо умножать критические значения на  $\sqrt{n}$ .



# Тест Колмогорова

## Несколько технических примечаний

- Иногда тест Колмогорова также именуют тестом Колмогорова-Смирнова.
- Найти таблицу распределения для распределения Колмогорова крайне сложно. Как правило, вместо таблицы с квантилями распределения Колмогорова, в учебниках и в интернете приводят таблицу критических значений для упрощенного вида тестовой статистики  $T(X) = d_n$ , то есть без  $\sqrt{n}$ . При использовании подобных таблиц следует либо использовать статистику  $T(X) = d_n$ , либо умножать критические значения на  $\sqrt{n}$ .
- Разбираться с данными таблицами не нужно. На контрольной работе будут непосредственно указаны квантили распределения Колмогорова (необходимо подобрать нужную в зависимости от уровня значимости, p-value считать для этого теста вручную не нужно, так как слишком сложно).

# Тест Хи-квадрат Пирсона о распределении

## Формулировка

- Рассмотрим выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из дискретного распределения (но можно обобщить и на случай непрерывного) с конечным носителем. То есть наблюдения принимают значения  $v_1, \dots, v_m$  с вероятностями  $p_1, \dots, p_m$  соответственно, где  $p_1 + \dots + p_m = 1$ .

# Тест Хи-квадрат Пирсона о распределении

## Формулировка

- Рассмотрим выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из дискретного распределения (но можно обобщить и на случай непрерывного) с конечным носителем. То есть наблюдения принимают значения  $v_1, \dots, v_m$  с вероятностями  $p_1, \dots, p_m$  соответственно, где  $p_1 + \dots + p_m = 1$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : p_1 = p_1^0, \dots, p_m = p_m^0$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sum_{i=1}^m \frac{(V_i - np_i^0)^2}{np_i^0}, \quad V_i = \sum_{j=1}^n I(X_j = v_i), \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \chi^2(m-1)$$

# Тест Хи-квадрат Пирсона о распределении

## Формулировка

- Рассмотрим выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из дискретного распределения (но можно обобщить и на случай непрерывного) с конечным носителем. То есть наблюдения принимают значения  $v_1, \dots, v_m$  с вероятностями  $p_1, \dots, p_m$  соответственно, где  $p_1 + \dots + p_m = 1$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : p_1 = p_1^0, \dots, p_m = p_m^0$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sum_{i=1}^m \frac{(V_i - np_i^0)^2}{np_i^0}, \quad V_i = \sum_{j=1}^n I(X_j = v_i), \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \chi^2(m-1)$$

Где  $V_i$  – количество наблюдений в выборке, принявших значение  $v_i$  (частота появления  $v_i$ ).

# Тест Хи-квадрат Пирсона о распределении

## Формулировка

- Рассмотрим выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из дискретного распределения (но можно обобщить и на случай непрерывного) с конечным носителем. То есть наблюдения принимают значения  $v_1, \dots, v_m$  с вероятностями  $p_1, \dots, p_m$  соответственно, где  $p_1 + \dots + p_m = 1$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : p_1 = p_1^0, \dots, p_m = p_m^0$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sum_{i=1}^m \frac{(V_i - np_i^0)^2}{np_i^0}, \quad V_i = \sum_{j=1}^n I(X_j = v_i), \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \chi^2(m-1)$$

Где  $V_i$  – количество наблюдений в выборке, принявших значение  $v_i$  (частота появления  $v_i$ ).

- Тестовая статистика измеряет, насколько математическое ожидание (при верной нулевой гипотезе) частоты появления значения  $v_i$ , то есть  $E(V_i|H_0) = np_i^0$ , отклоняется от фактически наблюдаемой частоты, то есть  $V_i$ . Чем больше соответствующие отклонения, тем менее правдоподобной кажется нулевая гипотеза, что мотивирует рассмотрение правосторонней критической области  $\mathcal{T}_\alpha = (\chi_{m-1, 1-\alpha}^2, \infty)$ . Где  $\chi_{m-1, 1-\alpha}^2$  – квантиль уровня  $1 - \alpha$  распределения  $\chi^2(m-1)$ .

# Тест Хи-квадрат Пирсона о распределении

## Формулировка

- Рассмотрим выборку  $X = (X_1, \dots, X_n)$  из дискретного распределения (но можно обобщить и на случай непрерывного) с конечным носителем. То есть наблюдения принимают значения  $v_1, \dots, v_m$  с вероятностями  $p_1, \dots, p_m$  соответственно, где  $p_1 + \dots + p_m = 1$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : p_1 = p_1^0, \dots, p_m = p_m^0$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sum_{i=1}^m \frac{(V_i - np_i^0)^2}{np_i^0}, \quad V_i = \sum_{j=1}^n I(X_j = v_i), \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \chi^2(m-1)$$

Где  $V_i$  – количество наблюдений в выборке, принявших значение  $v_i$  (частота появления  $v_i$ ).

- Тестовая статистика измеряет, насколько математическое ожидание (при верной нулевой гипотезе) частоты появления значения  $v_i$ , то есть  $E(V_i|H_0) = np_i^0$ , отклоняется от фактически наблюдаемой частоты, то есть  $V_i$ . Чем больше соответствующие отклонения, тем менее правдоподобной кажется нулевая гипотеза, что мотивирует рассмотрение правосторонней критической области  $\mathcal{T}_\alpha = (\chi_{m-1, 1-\alpha}^2, \infty)$ . Где  $\chi_{m-1, 1-\alpha}^2$  – квантиль уровня  $1 - \alpha$  распределения  $\chi^2(m-1)$ .
- Очевидно, что  $p\text{-value} = 1 - F_{\chi^2(m-1)}(T(x))$ .

# Тест Хи-квадрат Пирсона о распределении

## Пример

Лесничий утверждает, что бобры в лесу встречаются вдвое реже, чем зайцы и вдвое чаще, чем белки. На летних каникулах Лаврентий часто посещал лес и встретил 30 бобров, 50 зайцев и 20 белок. Поможем Лаврентию, на уровне значимости 10%, протестировать гипотезу о том, что Лесничий говорит правду.

# Тест Хи-квадрат Пирсона о распределении

## Пример

Лесничий утверждает, что бобры в лесу встречаются вдвое реже, чем зайцы и вдвое чаще, чем белки. На летних каникулах Лаврентий часто посещал лес и встретил 30 бобров, 50 зайцев и 20 белок. Поможем Лаврентию, на уровне значимости 10%, протестировать гипотезу о том, что Лесничий говорит правду.

- У Лаврентия есть выборка из  $n = 100$  наблюдений. Без потери общности будем обозначать бобров как 1, зайцев как 2, а белок как 3, откуда  $x = (\underbrace{1, \dots, 1}_{30 \text{ раз}}, \underbrace{2, \dots, 2}_{50 \text{ раз}}, \underbrace{3, \dots, 3}_{20 \text{ раз}})$ , следовательно  $V_1(x) = 30$ ,  $V_2(x) = 50$  и  $V_3(x) = 20$ .



# Тест Хи-квадрат Пирсона о распределении

## Пример

Лесничий утверждает, что бобры в лесу встречаются вдвое реже, чем зайцы и вдвое чаще, чем белки. На летних каникулах Лаврентий часто посещал лес и встретил 30 бобров, 50 зайцев и 20 белок. Поможем Лаврентию, на уровне значимости 10%, протестировать гипотезу о том, что Лесничий говорит правду.

- У Лаврентия есть выборка из  $n = 100$  наблюдений. Без потери общности будем обозначать бобров как 1, зайцев как 2, а белок как 3, откуда  $x = (\underbrace{1, \dots, 1}_{30 \text{ раз}}, \underbrace{2, \dots, 2}_{50 \text{ раз}}, \underbrace{3, \dots, 3}_{20 \text{ раз}})$ , следовательно  $V_1(x) = 30$ ,  $V_2(x) = 50$  и  $V_3(x) = 20$ .
- Поскольку  $p_1^0 = 0.5p_2^0$  и  $p_1^0 = 2p_3^0 = 2(1 - p_1^0 - p_2^0)$ , то  $p_1^0 = 2/7$ ,  $p_2^0 = 4/7$  и  $p_3^0 = 1/7$ . Следовательно тестируется гипотеза  $H_0 : p_1 = 2/7, p_2 = 4/7, p_3 = 1/7$ .

# Тест Хи-квадрат Пирсона о распределении

## Пример

Лесничий утверждает, что бобры в лесу встречаются вдвое реже, чем зайцы и вдвое чаще, чем белки. На летних каникулах Лаврентий часто посещал лес и встретил 30 бобров, 50 зайцев и 20 белок. Поможем Лаврентию, на уровне значимости 10%, протестировать гипотезу о том, что Лесничий говорит правду.

- У Лаврентия есть выборка из  $n = 100$  наблюдений. Без потери общности будем обозначать бобров как 1, зайцев как 2, а белок как 3, откуда  $x = (\underbrace{1, \dots, 1}_{30 \text{ раз}}, \underbrace{2, \dots, 2}_{50 \text{ раз}}, \underbrace{3, \dots, 3}_{20 \text{ раз}})$ , следовательно  $V_1(x) = 30$ ,  $V_2(x) = 50$  и  $V_3(x) = 20$ .
- Поскольку  $p_1^0 = 0.5p_2^0$  и  $p_1^0 = 2p_3^0 = 2(1 - p_1^0 - p_2^0)$ , то  $p_1^0 = 2/7$ ,  $p_2^0 = 4/7$  и  $p_3^0 = 1/7$ . Следовательно тестируется гипотеза  $H_0 : p_1 = 2/7, p_2 = 4/7, p_3 = 1/7$ .
- Рассчитаем реализацию тестовой статистики:

$$T(x) = \frac{(30 - 100 \times 2/7)^2}{100 \times 2/7} + \frac{(50 - 100 \times 4/7)^2}{100 \times 4/7} + \frac{(20 - 100 \times 1/7)^2}{100 \times 1/7} = 3.25$$

# Тест Хи-квадрат Пирсона о распределении

## Пример

Лесничий утверждает, что бобры в лесу встречаются вдвое реже, чем зайцы и вдвое чаще, чем белки. На летних каникулах Лаврентий часто посещал лес и встретил 30 бобров, 50 зайцев и 20 белок. Поможем Лаврентию, на уровне значимости 10%, протестировать гипотезу о том, что Лесничий говорит правду.

- У Лаврентия есть выборка из  $n = 100$  наблюдений. Без потери общности будем обозначать бобров как 1, зайцев как 2, а белок как 3, откуда  $x = (\underbrace{1, \dots, 1}_{30 \text{ раз}}, \underbrace{2, \dots, 2}_{50 \text{ раз}}, \underbrace{3, \dots, 3}_{20 \text{ раз}})$ , следовательно

$$V_1(x) = 30, V_2(x) = 50 \text{ и } V_3(x) = 20.$$

- Поскольку  $p_1^0 = 0.5p_2^0$  и  $p_1^0 = 2p_3^0 = 2(1 - p_1^0 - p_2^0)$ , то  $p_1^0 = 2/7$ ,  $p_2^0 = 4/7$  и  $p_3^0 = 1/7$ . Следовательно тестируется гипотеза  $H_0 : p_1 = 2/7, p_2 = 4/7, p_3 = 1/7$ .
- Рассчитаем реализацию тестовой статистики:

$$T(x) = \frac{(30 - 100 \times 2/7)^2}{100 \times 2/7} + \frac{(50 - 100 \times 4/7)^2}{100 \times 4/7} + \frac{(20 - 100 \times 1/7)^2}{100 \times 1/7} = 3.25$$

- Поскольку  $p\text{-value} = 1 - F_{\chi^2(3-1)}(3.25) \approx 0.197 > 0.1$ , то нулевая гипотеза не отвергается на 10%-м уровне значимости.

# Выборочная корреляция

## Формулировка

- Имеются выборки  $X = (X_1, \dots, X_n)$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$ , такие, что  $\text{Corr}(X_i, Y_j) = \rho$  при  $i = j$  и  $X_i, Y_j$  независимы при любых  $i \neq j$ .

# Выборочная корреляция

## Формулировка

- Имеются выборки  $X = (X_1, \dots, X_n)$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$ , такие, что  $\text{Corr}(X_i, Y_j) = \rho$  при  $i = j$  и  $X_i, Y_j$  независимы при любых  $i \neq j$ .
- Состоятельная оценка корреляции  $\hat{\rho}_n \xrightarrow{P} \rho$ , именуемая выборочной корреляцией, имеет вид:

$$\hat{\rho}_n = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n) (Y_i - \bar{Y}_n)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_n)^2}} = \frac{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i Y_i \right) - \bar{X}_n \bar{Y}_n}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_n)^2}}$$

# Выборочная корреляция

## Формулировка

- Имеются выборки  $X = (X_1, \dots, X_n)$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$ , такие, что  $\text{Corr}(X_i, Y_j) = \rho$  при  $i = j$  и  $X_i, Y_j$  независимы при любых  $i \neq j$ .
- Состоятельная оценка корреляции  $\hat{\rho}_n \xrightarrow{P} \rho$ , именуемая выборочной корреляцией, имеет вид:

$$\hat{\rho}_n = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n) (Y_i - \bar{Y}_n)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_n)^2}} = \frac{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i Y_i \right) - \bar{X}_n \bar{Y}_n}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_n)^2}}$$

- Для доказательства достаточно несколько раз применить теорему Слущкого, предварительно показав, что:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i Y_i &\xrightarrow{P} E(X_1 Y_1), & \bar{X}_n \bar{Y}_n &\xrightarrow{P} E(X_1) E(Y_1) \\ \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2} &\xrightarrow{P} \sqrt{\text{Var}(X_1)}, & \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_n)^2} &\xrightarrow{P} \sqrt{\text{Var}(Y_1)} \end{aligned}$$

# Выборочная корреляция

## Пример

Лаврентий оценивает корреляцию между ценой и продажами различных товаров по данным о  $n = 100$  фирмах. Средняя цена и средняя выручка оказались равны 50 и 9925, а общий объем продаж всех фирм составил 20000. Наконец, (не исправленные) выборочные дисперсии для цены и объема продаж оказались равны 100 и 225 соответственно.

# Выборочная корреляция

## Пример

Лаврентий оценивает корреляцию между ценой и продажами различных товаров по данным о  $n = 100$  фирмах. Средняя цена и средняя выручка оказались равны 50 и 9925, а общий объем продаж всех фирм составил 20000. Наконец, (не исправленные) выборочные дисперсии для цены и объема продаж оказались равны 100 и 225 соответственно.

- Через  $X = (X_1, \dots, X_{100})$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_{100})$  обозначим выборки из цен и объемов продаж.



# Выборочная корреляция

## Пример

Лаврентий оценивает корреляцию между ценой и продажами различных товаров по данным о  $n = 100$  фирмах. Средняя цена и средняя выручка оказались равны 50 и 9925, а общий объем продаж всех фирм составил 20000. Наконец, (не исправленные) выборочные дисперсии для цены и объема продаж оказались равны 100 и 225 соответственно.

- Через  $X = (X_1, \dots, X_{100})$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_{100})$  обозначим выборки из цен и объемов продаж.
- Из условия известно, что:

$$\bar{x}_{100} = 50, \quad \sum_{i=1}^{100} y_i = 20000 \implies \bar{y}_{100} = 20000/100 = 200, \quad \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} x_i y_i = 9925$$

# Выборочная корреляция

## Пример

Лаврентий оценивает корреляцию между ценой и продажами различных товаров по данным о  $n = 100$  фирмах. Средняя цена и средняя выручка оказались равны 50 и 9925, а общий объем продаж всех фирм составил 20000. Наконец, (не исправленные) выборочные дисперсии для цены и объема продаж оказались равны 100 и 225 соответственно.

- Через  $X = (X_1, \dots, X_{100})$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_{100})$  обозначим выборки из цен и объемов продаж.
- Из условия известно, что:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{100} = 50, \quad \sum_{i=1}^{100} y_i = 20000 &\implies \bar{y}_{100} = 20000/100 = 200, & \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} x_i y_i = 9925 \\ \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x}_{100})^2 = 100, & \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} (y_i - \bar{y}_{100})^2 = 225 \end{aligned}$$

# Выборочная корреляция

## Пример

Лаврентий оценивает корреляцию между ценой и продажами различных товаров по данным о  $n = 100$  фирмах. Средняя цена и средняя выручка оказались равны 50 и 9925, а общий объем продаж всех фирм составил 20000. Наконец, (не исправленные) выборочные дисперсии для цены и объема продаж оказались равны 100 и 225 соответственно.

- Через  $X = (X_1, \dots, X_{100})$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_{100})$  обозначим выборки из цен и объемов продаж.
- Из условия известно, что:

$$\bar{x}_{100} = 50, \quad \sum_{i=1}^{100} y_i = 20000 \implies \bar{y}_{100} = 20000/100 = 200, \quad \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} x_i y_i = 9925$$
$$\frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x}_{100})^2 = 100, \quad \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} (y_i - \bar{y}_{100})^2 = 225$$

- Пользуясь найденными реализациями получаем:

$$\hat{\rho}_n(x) = \frac{9925 - 50 \times 200}{\sqrt{100 \times 225}} = -0.5$$

# Выборочная корреляция

Визуализация в игровой форме

Попробуйте набрать как можно больше очков в игре по ссылке, угадывая значение реализации выборочного коэффициент корреляции по графику:

[guessthecorrelation.com](https://guessthecorrelation.com)

# Тестирование гипотезы о корреляции

## Формулировка

- Имеются выборки  $X = (X_1, \dots, X_n)$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$  из нормального распределения, такие, что  $\text{Corr}(X_i, Y_j) = \rho$  при  $i = j$  и  $X_i, Y_j$  независимы при любых  $i \neq j$ .

# Тестирование гипотезы о корреляции

## Формулировка

- Имеются выборки  $X = (X_1, \dots, X_n)$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$  из нормального распределения, такие, что  $\text{Corr}(X_i, Y_j) = \rho$  при  $i = j$  и  $X_i, Y_j$  независимы при любых  $i \neq j$ .
- На уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : \rho = 0$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \hat{\rho}_n \sqrt{\frac{n-2}{1 - \hat{\rho}_n^2}}, \quad T(X)|H_0 \sim t(n-2)$$

# Тестирование гипотезы о корреляции

## Формулировка

- Имеются выборки  $X = (X_1, \dots, X_n)$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$  из нормального распределения, такие, что  $\text{Corr}(X_i, Y_j) = \rho$  при  $i = j$  и  $X_i, Y_j$  независимы при любых  $i \neq j$ .
- На уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : \rho = 0$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \hat{\rho}_n \sqrt{\frac{n-2}{1-\hat{\rho}_n^2}}, \quad T(X)|H_0 \sim t(n-2)$$

- Рассмотрим несколько типов альтернативных гипотез, через  $t_{n-2,q}$  обозначая квантиль уровня  $q$  распределения  $t(n-2)$ :

Тип	Левосторонняя	Двухсторонняя	Правосторонняя
Гипотеза	$H_1 : \rho < 0$	$H_1 : \rho \neq 0$	$H_1 : \rho > 0$
$\mathcal{T}_\alpha$	$(-\infty, -t_{n-2,1-\alpha})$	$(-\infty, -t_{n-2,1-\alpha/2}) \cup (t_{n-2,1-\alpha/2}, \infty)$	$(t_{n-2,1-\alpha}, \infty)$
p-value	$F_{t(n-2)}(T(x))$	$2 \min(F_{t(n-2)}(T(x)), 1 - F_{t(n-2)}(T(x)))$	$1 - F_{t(n-2)}(T(x))$

# Тестирование гипотезы о корреляции

## Пример

Ученый кот тестирует гипотезу о наличии корреляции между бюджетом и кассовыми сборами фильмов, предполагая, что они хорошо описываются нормальным распределением. Реализация выборочного коэффициента корреляции, посчитанного по выборке из 227 фильмов, оказалась равна 0.6. На уровне значимости 1% протестируем гипотезу об отсутствии корреляции между бюджетом и кассовыми сборами против двухсторонней альтернативы.



# Тестирование гипотезы о корреляции

## Пример

Ученый кот тестирует гипотезу о наличии корреляции между бюджетом и кассовыми сборами фильмов, предполагая, что они хорошо описываются нормальным распределением. Реализация выборочного коэффициента корреляции, посчитанного по выборке из 227 фильмов, оказалась равна 0.6. На уровне значимости 1% протестируем гипотезу об отсутствии корреляции между бюджетом и кассовыми сборами против двухсторонней альтернативы.

- Рассчитаем реализацию тестовой статистики:

$$T(x) = \sqrt{\frac{227 - 2}{1 - 0.6^2}} 0.6 = 11.25$$

# Тестирование гипотезы о корреляции

## Пример

Ученый кот тестирует гипотезу о наличии корреляции между бюджетом и кассовыми сборами фильмов, предполагая, что они хорошо описываются нормальным распределением. Реализация выборочного коэффициента корреляции, посчитанного по выборке из 227 фильмов, оказалась равна 0.6. На уровне значимости 1% протестируем гипотезу об отсутствии корреляции между бюджетом и кассовыми сборами против двухсторонней альтернативы.

- Рассчитаем реализацию тестовой статистики:

$$T(x) = \sqrt{\frac{227-2}{1-0.6^2}} 0.6 = 11.25$$

- Вычислим p-value:

$$p\text{-value} = 2 \min(F_{t(227-2)}(11.25), 1 - F_{t(227-2)}(11.25)) \approx 0$$

В результате нулевая гипотеза отвергается на любом разумном уровне значимости, в том числе на 1%-м.

# Тест Хи-квадрат Пирсона о независимости

## Формулировка

- Рассмотрим выборки  $X = (X_1, \dots, X_n)$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$  из дискретных распределений (но можно обобщить и на случай непрерывного) с конечным носителем. То есть наблюдения выборки  $Z \in \{X, Y\}$  принимают значения  $v_{Z,1}, \dots, v_{Z,m_Z}$  с вероятностями  $p_{Z,1}, \dots, p_{Z,m_Z}$  соответственно, где  $p_{Z,1} + \dots + p_{Z,m_Z} = 1$ . Предположим, что  $X_i$  и  $Y_j$  независимы при  $i \neq j$ , причем случайные векторы  $(X_i, Y_i)$  одинаково распределены при любом  $i \in \{1, \dots, n\}$ .

# Тест Хи-квадрат Пирсона о независимости

## Формулировка

- Рассмотрим выборки  $X = (X_1, \dots, X_n)$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$  из дискретных распределений (но можно обобщить и на случай непрерывного) с конечным носителем. То есть наблюдения выборки  $Z \in \{X, Y\}$  принимают значения  $v_{Z,1}, \dots, v_{Z,m_Z}$  с вероятностями  $p_{Z,1}, \dots, p_{Z,m_Z}$  соответственно, где  $p_{Z,1} + \dots + p_{Z,m_Z} = 1$ . Предположим, что  $X_i$  и  $Y_j$  независимы при  $i \neq j$ , причем случайные векторы  $(X_i, Y_i)$  одинаково распределены при любом  $i \in \{1, \dots, n\}$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : (X_1 \text{ и } Y_1 \text{ независимы})$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sum_{i=1}^{m_X} \sum_{j=1}^{m_Y} \frac{(V_{i,j} - n\hat{p}_{X,i}\hat{p}_{Y,j})^2}{n\hat{p}_{X,i}\hat{p}_{Y,j}}, \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \chi^2((m_X - 1)(m_Y - 1))$$

$$\hat{p}_{X,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I(X_j = v_{X,i}), \quad \hat{p}_{Y,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I(Y_j = v_{Y,i}), \quad V_{i,j} = \sum_{k=1}^n I(X_k = v_{X,i})I(Y_k = v_{Y,j})$$

# Тест Хи-квадрат Пирсона о независимости

## Формулировка

- Рассмотрим выборки  $X = (X_1, \dots, X_n)$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$  из дискретных распределений (но можно обобщить и на случай непрерывного) с конечным носителем. То есть наблюдения выборки  $Z \in \{X, Y\}$  принимают значения  $v_{Z,1}, \dots, v_{Z,m_Z}$  с вероятностями  $p_{Z,1}, \dots, p_{Z,m_Z}$  соответственно, где  $p_{Z,1} + \dots + p_{Z,m_Z} = 1$ . Предположим, что  $X_i$  и  $Y_j$  независимы при  $i \neq j$ , причем случайные векторы  $(X_i, Y_i)$  одинаково распределены при любом  $i \in \{1, \dots, n\}$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : (X_1 \text{ и } Y_1 \text{ независимы})$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sum_{i=1}^{m_X} \sum_{j=1}^{m_Y} \frac{(V_{i,j} - n\hat{p}_{X,i}\hat{p}_{Y,j})^2}{n\hat{p}_{X,i}\hat{p}_{Y,j}}, \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \chi^2((m_X - 1)(m_Y - 1))$$

$$\hat{p}_{X,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I(X_j = v_{X,i}), \quad \hat{p}_{Y,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I(Y_j = v_{Y,i}), \quad V_{i,j} = \sum_{k=1}^n I(X_k = v_{X,i})I(Y_k = v_{Y,j})$$

Где  $V_{i,j}$  - частота, с которой встречается пара  $(v_{X,i}, v_{Y,j})$ .  $\hat{p}_{X,i}\hat{p}_{Y,j}$  - оценка вероятности получить пару  $(v_{X,i}, v_{Y,j})$  при верной нулевой гипотезе о независимости.  $n\hat{p}_{X,i}\hat{p}_{Y,j}$  - оценка ожидаемой частоты появления пары  $(v_{X,i}, v_{Y,j})$  при верной нулевой гипотезе.

# Тест Хи-квадрат Пирсона о независимости

## Формулировка

- Рассмотрим выборки  $X = (X_1, \dots, X_n)$  и  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$  из дискретных распределений (но можно обобщить и на случай непрерывного) с конечным носителем. То есть наблюдения выборки  $Z \in \{X, Y\}$  принимают значения  $v_{Z,1}, \dots, v_{Z,m_Z}$  с вероятностями  $p_{Z,1}, \dots, p_{Z,m_Z}$  соответственно, где  $p_{Z,1} + \dots + p_{Z,m_Z} = 1$ . Предположим, что  $X_i$  и  $Y_j$  независимы при  $i \neq j$ , причем случайные векторы  $(X_i, Y_i)$  одинаково распределены при любом  $i \in \{1, \dots, n\}$ .
- При  $n \geq 50$  на уровне значимости  $\alpha$  гипотезу  $H_0 : (X_1 \text{ и } Y_1 \text{ независимы})$  можно протестировать с помощью следующей тестовой статистики с критической областью  $\mathcal{T}_\alpha$ :

$$T(X) = \sum_{i=1}^{m_X} \sum_{j=1}^{m_Y} \frac{(V_{i,j} - n\hat{p}_{X,i}\hat{p}_{Y,j})^2}{n\hat{p}_{X,i}\hat{p}_{Y,j}}, \quad T(X)|H_0 \xrightarrow{d} \chi^2((m_X - 1)(m_Y - 1))$$

$$\hat{p}_{X,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I(X_j = v_{X,i}), \quad \hat{p}_{Y,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I(Y_j = v_{Y,i}), \quad V_{i,j} = \sum_{k=1}^n I(X_k = v_{X,i})I(Y_k = v_{Y,j})$$

Где  $V_{i,j}$  - частота, с которой встречается пара  $(v_{X,i}, v_{Y,j})$ .  $\hat{p}_{X,i}\hat{p}_{Y,j}$  - оценка вероятности получить пару  $(v_{X,i}, v_{Y,j})$  при верной нулевой гипотезе о независимости.  $n\hat{p}_{X,i}\hat{p}_{Y,j}$  - оценка ожидаемой частоты появления пары  $(v_{X,i}, v_{Y,j})$  при верной нулевой гипотезе.

- Из асимптотического распределения тестовой статистики при условии верной нулевой гипотезы получаем, что  $p\text{-value} = 1 - F_{\chi^2((m_X-1)(m_Y-1))}(T(X))$  и  $\mathcal{T}_\alpha = (\chi^2_{(m_X-1)(m_Y-1), 1-\alpha}, \infty)$ .

# Тест Хи-квадрат Пирсона о независимости

## Пример

Изучается зависимость между числом пересдач у студентов и формой обучения: онлайн или оффлайн. Результаты опроса  $n = 350$  случайно отобранных студентов были собраны в таблицу:

Форма обучения \ Число пересдач	0	1	2
	0 (оффлайн)	40	10
1 (онлайн)	50	35	15

Например, из таблицы следует, что всего в онлайн обучалось  $50 + 35 + 15 = 100$  студентов и у 35 из них имеется ровно одна пересдача.

# Тест Хи-квадрат Пирсона о независимости

## Пример

Изучается зависимость между числом пересдач у студентов и формой обучения: онлайн или оффлайн. Результаты опроса  $n = 350$  случайно отобранных студентов были собраны в таблицу:

Форма обучения \ Число пересдач	Число пересдач		
	0	1	2
0 (оффлайн)	200	40	10
1 (онлайн)	50	35	15

Например, из таблицы следует, что всего в онлайн обучалось  $50 + 35 + 15 = 100$  студентов и у 35 из них имеется ровно одна пересдача.

- Через  $X$  и  $Y$  обозначим выборки из числа пересдач и форм обучения соответственно. Из таблицы следует, что  $m_X = 3$  и  $m_Y = 2$ . Кроме того, в  $(i, j)$ -й ячейке таблицы фактически располагается  $V_{i,j}(x, y)$ , например,  $V_{3,2}(x, y) = 15$ . Наконец, найдем реализации оценок вероятностей:



# Тест Хи-квадрат Пирсона о независимости

## Пример

Изучается зависимость между числом пересдач у студентов и формой обучения: онлайн или оффлайн. Результаты опроса  $n = 350$  случайно отобранных студентов были собраны в таблицу:

Форма обучения \ Число пересдач	Число пересдач		
	0	1	2
0 (оффлайн)	200	40	10
1 (онлайн)	50	35	15

Например, из таблицы следует, что всего в онлайн обучалось  $50 + 35 + 15 = 100$  студентов и у 35 из них имеется ровно одна пересдача.

- Через  $X$  и  $Y$  обозначим выборки из числа пересдач и форм обучения соответственно. Из таблицы следует, что  $m_X = 3$  и  $m_Y = 2$ . Кроме того, в  $(i, j)$ -й ячейке таблицы фактически располагается  $V_{i,j}(x, y)$ , например,  $V_{3,2}(x, y) = 15$ . Наконец, найдем реализации оценок вероятностей:

$$\hat{p}_{X,1}(x) = (200 + 50)/350 = 10/14, \quad \hat{p}_{X,2}(x) = (40 + 35)/350 = 3/14, \quad \hat{p}_{X,3}(x) = (10 + 15)/350 = 1/14$$

# Тест Хи-квадрат Пирсона о независимости

## Пример

Изучается зависимость между числом пересдач у студентов и формой обучения: онлайн или оффлайн. Результаты опроса  $n = 350$  случайно отобранных студентов были собраны в таблицу:

Форма обучения \ Число пересдач	Число пересдач		
	0	1	2
0 (оффлайн)	200	40	10
1 (онлайн)	50	35	15

Например, из таблицы следует, что всего в онлайн обучалось  $50 + 35 + 15 = 100$  студентов и у 35 из них имеется ровно одна пересдача.

- Через  $X$  и  $Y$  обозначим выборки из числа пересдач и форм обучения соответственно. Из таблицы следует, что  $m_X = 3$  и  $m_Y = 2$ . Кроме того, в  $(i, j)$ -й ячейке таблицы фактически располагается  $V_{i,j}(x, y)$ , например,  $V_{3,2}(x, y) = 15$ . Наконец, найдем реализации оценок вероятностей:

$$\hat{p}_{X,1}(x) = (200 + 50)/350 = 10/14, \quad \hat{p}_{X,2}(x) = (40 + 35)/350 = 3/14, \quad \hat{p}_{X,3}(x) = (10 + 15)/350 = 1/14$$

$$\hat{p}_{Y,1}(y) = (200 + 40 + 10)/350 = 10/14, \quad \hat{p}_{Y,2}(y) = (40 + 35)/350 = 4/14$$

# Тест Хи-квадрат Пирсона о независимости

## Пример

Изучается зависимость между числом пересдач у студентов и формой обучения: онлайн или оффлайн. Результаты опроса  $n = 350$  случайно отобранных студентов были собраны в таблицу:

Форма обучения \ Число пересдач	0	1	2
	0 (оффлайн)	40	10
1 (онлайн)	50	35	15

Например, из таблицы следует, что всего в онлайн обучалось  $50 + 35 + 15 = 100$  студентов и у 35 из них имеется ровно одна пересдача.

- Через  $X$  и  $Y$  обозначим выборки из числа пересдач и форм обучения соответственно. Из таблицы следует, что  $m_X = 3$  и  $m_Y = 2$ . Кроме того, в  $(i, j)$ -й ячейке таблицы фактически располагается  $V_{i,j}(x, y)$ , например,  $V_{3,2}(x, y) = 15$ . Наконец, найдем реализации оценок вероятностей:

$$\hat{p}_{X,1}(x) = (200 + 50)/350 = 10/14, \quad \hat{p}_{X,2}(x) = (40 + 35)/350 = 3/14, \quad \hat{p}_{X,3}(x) = (10 + 15)/350 = 1/14$$

$$\hat{p}_{Y,1}(y) = (200 + 40 + 10)/350 = 10/14, \quad \hat{p}_{Y,2}(y) = (40 + 35)/350 = 4/14$$

$$T(x) = \frac{(200 - 350 \times (10/14)(10/14))^2}{350 \times (10/14)(10/14)} + \dots + \frac{(15 - 350 \times (1/14)(4/14))^2}{350 \times (1/14)(4/14)} \approx 33.133$$

# Тест Хи-квадрат Пирсона о независимости

## Пример

Изучается зависимость между числом пересдач у студентов и формой обучения: онлайн или оффлайн. Результаты опроса  $n = 350$  случайно отобранных студентов были собраны в таблицу:

Форма обучения \ Число пересдач	Число пересдач		
	0	1	2
0 (оффлайн)	200	40	10
1 (онлайн)	50	35	15

Например, из таблицы следует, что всего в онлайн обучалось  $50 + 35 + 15 = 100$  студентов и у 35 из них имеется ровно одна пересдача.

- Через  $X$  и  $Y$  обозначим выборки из числа пересдач и форм обучения соответственно. Из таблицы следует, что  $m_X = 3$  и  $m_Y = 2$ . Кроме того, в  $(i, j)$ -й ячейке таблицы фактически располагается  $V_{i,j}(x, y)$ , например,  $V_{3,2}(x, y) = 15$ . Наконец, найдем реализации оценок вероятностей:

$$\hat{p}_{X,1}(x) = (200 + 50)/350 = 10/14, \quad \hat{p}_{X,2}(x) = (40 + 35)/350 = 3/14, \quad \hat{p}_{X,3}(x) = (10 + 15)/350 = 1/14$$

$$\hat{p}_{Y,1}(y) = (200 + 40 + 10)/350 = 10/14, \quad \hat{p}_{Y,2}(y) = (40 + 35)/350 = 4/14$$

$$T(x) = \frac{(200 - 350 \times (10/14)(10/14))^2}{350 \times (10/14)(10/14)} + \dots + \frac{(15 - 350 \times (1/14)(4/14))^2}{350 \times (1/14)(4/14)} \approx 33.133$$

- Поскольку  $p\text{-value} = 1 - F_{\chi^2((3-1)(2-1))}(33.133) = 1 - F_{\chi^2(2)}(33.133) \approx 0$ , то нулевая гипотеза отвергается на любом разумном уровне значимости.