

# **Повторение независимых испытаний**

## **СХЕМА БЕРНУЛЛИ**

Рассмотрим случай, когда одно и то же испытание повторяется несколько раз - проводится серия испытаний в одинаковых условиях, т. е.

вероятность появления события  $A$  во всех опытах одна и та же ( $\text{const}$ ). Такие испытания называются **повторными независимыми**.

В задачах определим вероятность появления события  $A$   $k$  раз (любое заданное количество раз), в серии из  $n$  опытов.

# Примеры независимых испытаний

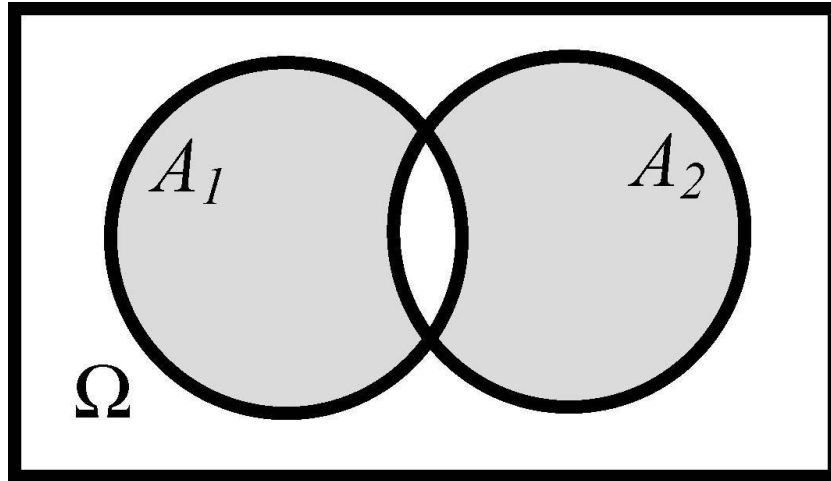
1. Несколько последовательных бросаний монеты.
2. Несколько последовательных выниманий карты из колоды, при условии, что карта возвращается каждый раз и колода перемешивается, т.е. выборка с возвращением (иначе испытания –зависимые).
3. Несколько последовательных бросаний игральной кости...

Пусть в результате случайного испытания может произойти или не произойти событие  $A$ . Если событие наступило, назовём испытание успешным, а событие – **успехом**. Испытание повторяется  $n$  раз. При этом соблюдаются условия:

- вероятность успеха  $P(A) = p$  в каждом испытании одна и та же;
- результат любого испытания не зависит от исходов предыдущих.

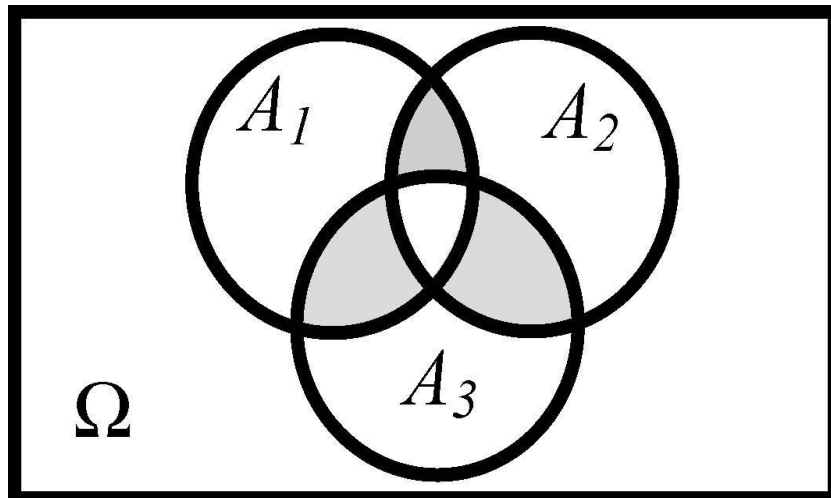
Рассмотрим несколько примеров:

1)



Два испытания,  $B$ : ”только в одном успех”  
(закрашенная область соответствует событию  $B$ )

2)



Три испытания,  $B$ : ”только в двух успех”  
(закрашенная область соответствует событию  $B$ )

Рассмотрим событие  $B_m$ , состоящее в том, что событие  $A$  в этих  $n$  испытаниях наступит ровно  $m$  раз и не наступит ровно  $(n - m)$  раз.

Обозначим  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) появление события  $A$ ,  $\bar{A}_i$  - непоявление  $A$  в  $i$ -м испытании.

В силу постоянства условий испытания:

$$P(A_1) = P(A_2) = \dots = P(A_n) = p$$

$$P(\bar{A}_1) = P(\bar{A}_2) = \dots = P(\bar{A}_n) = 1 - p = q$$

$A$  может появиться  $m$  раз в разных комбинациях, чередуясь с противоположным  $\bar{A}$ .

Число возможных комбинаций равно числу сочетаний из  $n$  элементов по  $m$ , т. е.  $C_n^m$ .

Следовательно, событие  $B_m$  можно представить в виде суммы сложных несовместных событий, причем число слагаемых равно  $C_n^m$ :

$$B_m = A_1 A_2 \dots A_m \bar{A}_{m+1} \dots \bar{A}_n + \dots \\ \dots + \bar{A}_1 \bar{A}_2 \dots \bar{A}_{n-m} A_{n-m+1} \dots A_n$$

где в каждое произведение  $A$  входит  $m$  раз,  
 $\bar{A}$  -  $(n - m)$  раз.

Вероятность каждого сложного события формулы по т. умножения вероятностей независимых событий равна  $p^m q^{n-m}$ .

Так как общее количество таких событий  $C_n^m$ , то по т. сложения вероятностей несовместных событий вероятность события  $B_m$  (об.  $P_m(n)$ ):

$$P_n(m) = C_n^m \cdot p^m q^{n-m} \quad \text{или}$$

$$P_n(m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} \cdot p^m q^{n-m}$$

Формулу называют **формулой Бернулли**, а повторяющиеся испытания, удовлетворяющие условию независимости и постоянства вероятностей наз. **схемой (испытаниями) Бернулли**.



**Пример.** Игральная кость брошена 6 раз. Найти вероятность, что ровно 3 раза выпадет «шестёрка».

**Решение.** Шестикратное бросание кости можно рассматривать как последовательность независимых испытаний с вероятностью успеха («шестерки»)  $1/6$ , и вероятностью неудачи —  $5/6$ . Искомую вероятность вычисляем по формуле:

$$P_n(m) = P_6(3) = C_6^3 \cdot \left(\frac{1}{6}\right)^3 \left(\frac{5}{6}\right)^3 = 0,053$$

**Пример.** Игральная кость брошена 4 раза. Найти вероятность, что «6» появится не более 2-х раз.

**Решение:** Пусть событие  $B$  - шестерка появится не более двух раз.

$B$  является суммой несовместных событий:  $B_0$  – шестерка не появится ни разу;  $B_1$  – появится 1 раз;  $B_2$  – появится 2 раза.

Произведенное испытание – бросание игральной кости. Событие  $A$  (успех) – выпадение «6».

Событие  $\bar{A}$  (неудача) – выпадение любого числа очков, кроме «6».

По классическому определению вероятности:

$$P(A) = \frac{1}{6} = p, \quad P(\bar{A}) = \frac{5}{6} = q$$

Таких испытаний по условию производится 4.

Тогда вероятность, что в 4-х независимых испытаниях будет 0 успехов:

$$P_4(0) = C_4^0 p^0 q^4 = \left(\frac{1}{6}\right)^0 \left(\frac{5}{6}\right)^4 = \frac{5^4}{6^4} = \frac{625}{1296} = P(B_0)$$

Аналогично:

$$P_4(1) = C_4^1 p^1 q^3 = 4 \cdot \left(\frac{1}{6}\right)^1 \left(\frac{5}{6}\right)^3 = 4 \cdot \frac{5^3}{6^4} = \frac{500}{1296} = P(B_1)$$

$$P_4(2) = C_4^2 p^2 q^2 = 6 \cdot \left(\frac{1}{6}\right)^2 \left(\frac{5}{6}\right)^2 = 6 \cdot \frac{5^2}{6^4} = \frac{150}{1296} = P(B_2)$$

Используя т. сложения несовместных событий:

$$\begin{aligned} P(B) &= P(B_0 + B_1 + B_2) = P(B_0) + P(B_1) + P(B_2) = \\ &= \frac{625}{1296} + \frac{500}{1296} + \frac{150}{1296} = \frac{1275}{1296} \approx 0,98379 \end{aligned}$$

Рассмотрим следующий пример, когда из двух очень похожих вопросов на один можно ответить, пользуясь формулой Бернулли, а для другого этой формулы оказывается недостаточно.

**Пример.** Система радиолокационных станций ведет наблюдение за группой объектов, состоящей из 8 единиц. Каждый объект может быть (независимо от других) потерян с вероятностью 0,1. Найти вероятность того, что хотя бы один из объектов будет потерян.

**Решение:** Пусть событие  $A = \{\text{потерять системой радиолокационных станций хотя бы один объект}\}$ , тогда:  $P(A) = P_8(1) + P_8(2) + \dots + P_8(8)$ .

Проще найти вероятность противоположного события - ни один объект не потерян.

$$P(\bar{A}) = P_8(0) = C_8^0 \cdot (0,1)^0 \cdot (0,9)^8 \approx 0,43;$$

$$P(A) = 1 - P(\bar{A}) \approx 1 - 0,43 = 0,57$$

# Наивероятнейшее число появлений события в независимых испытаниях

Число  $k_0$  (наступление события в независимых испытаниях, в каждом из которых вероятность появления события равна  $p$ ) называют **наивероятнейшим** если вероятность того, что событие наступит в этих испытаниях  $k_0$  раз, превышает вероятность остальных возможных исходов испытаний. Его определяют из двойного неравенства

- а) если число  $(np - q)$  – дробное, то существует одно наимвероятнейшее число  $k_0$ ;
- б) если число  $(np - q)$  – целое, то существует два наимвероятнейших числа, а именно  $k_0$  и  $k_0 + 1$ ;
- в) если число  $np$  – целое, то наимвероятнейшее число  $k_0 = np$ .



**Пример.** В урне 10 белых и 40 чёрных шаров. Вынимают подряд 14 шаров, причём цвет вынутого шара регистрируют, а затем шар возвращают в урну. Определить наиболее вероятное число появлений белого шара.

**Решение.** Здесь  $n = 14$ ,  $p = 10/50 = 1/5$ ,  $q = 1 - p = 4/5$ . Используя двойное неравенство  $np - q \leq k_0 \leq np + p$  при указанных значениях  $n$ ,  $p$  и  $q$ , получим  $14/5 - 4/5 \leq k_0 \leq 14/5 + 1/5$ , т.е.  $2 \leq k_0 \leq 3$ . Таким образом, задача имеет два решения:  $k_0 = 2$ ,  $k_0 = 3$ .

**Пример.** Вероятность попадания стрелком в цель равна 0,7. Сделано 25 выстрелов. Определить наиболее вероятное число попаданий в цель.

**Решение.** Здесь  $n = 25$ ,  $p = 0,7$ ,  $q = 0,3$ .

Следовательно,

$$25 \cdot 0,7 - 0,3 \leq k_0 \leq 25 \cdot 0,7 + 0,7, \text{ т.е. } 17,2 \leq k_0 \leq 18, 2.$$

Так как  $k_0$  – целое число, то  $k_0 = 18$ .

**Пример.** Два равносильных шахматиста играют в шахматы. Что вероятнее – выиграть две партии из 4-х или 4 из 6 (ничьи во внимание не принимают).

**Решение.** Т.к. играют равносильные шахматисты то вероятности выигрыша ( $p$ ) и проигрыша ( $q$ ) равны  $\frac{1}{2}$ .

Так как во всех партиях вероятность выигрыша постоянна и безразлично, в какой последовательности будут выиграны партии – применима формула Бернулли.

Вероятность, что 2 партии из 4 будут выиграны:

$$P_4(2) = C_4^2 \cdot p^2 \cdot q^2 = \frac{4 \cdot 3}{1 \cdot 2} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{6}{16}$$

Вероятность, что 3 партии из 6 будут выиграны:

$$P_6(3) = C_6^3 \cdot p^3 \cdot q^3 = \frac{6 \cdot 5 \cdot 4}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{5}{16}$$

**$P_4(2) > P_6(3)$** , то вероятность выиграть 2 партии из 4-х выше чем вероятность выиграть 3 партии из 6.

- **Независимые испытания с несколькими исходами**

**Пример.** Игральная кость подбрасывается 15 раз. Найти вероятности событий: а) выпадет ровно 10 троек; б) выпадет ровно 10 троек и 3 единицы.

**Решение.** а) Есть 15 испытаний схемы Бернулли с вероятностью успеха  $1/6$  (успех - выпадение «3»). Вероятность 10 успехов в 15-ти испытаниях:

$$P(a) = C_{15}^{10} \left(\frac{1}{6}\right)^{10} \left(1 - \frac{1}{6}\right)^{15-10}$$

б) каждое испытание имеет три, а не два исхода: выпадение тройки, выпадение единицы, выпадение остальных граней. Пусть в одном испытании возможны  $m$  исходов:  $1, 2, \dots, m$ , и исход  $i$  в одном испытании случается с вероятностью  $p_i$ , где  $p_1 + \dots + p_m = 1$

Обозначим через  $P(n_1, \dots, n_m)$  искомую вероятность того, что в  $n = n_1 + \dots + n_m$  независимых испытаниях исход 1 появился  $n_1$  раз, исход 2 -  $n_2$

**Теорема.** Для любого  $n$  и любых целых  $n_1 > 0, \dots, n_m > 0$  таких, что  $n_1 + \dots + n_m = n$ , верна формула:

$$P(n_1, \dots, n_m) = \frac{n!}{n_1! \dots n_m!} p_1^{n_1} \cdot \dots \cdot p_m^{n_m}$$

Так как вероятности выпадения тройки и единицы равны по  $1/6$ , а вероятность третьего исхода (выпали любые другие грани) равна  $4/6$ , то вероятность получить десять троек, три единицы и ещё два других очка равна:

$$P(6) = \frac{15!}{10! 3! 2!} \cdot \frac{1}{6^{10}} \cdot \frac{1}{6^3} \cdot \left(\frac{4}{6}\right)^2$$

# Формула Пуассона

В том случае, когда вероятность появления события  $p$  мала ( $p < 0,1$ ), а число независимых испытаний велико, для оценки вероятности появления события ровно  $k$  раз в  $n$  независимых испытаниях используется асимптотическая

формула Пуассона:

$$P_n(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \text{ где } \lambda = n \cdot p$$

$P_n(k)$

Значения при фиксированных  $k$  и  $\lambda$  можно



$k$	$\lambda$	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>
<b>0</b>		0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488
<b>1</b>		0,0905	0,1638	0,2222	0,2681	0,3033	0,3293
<b>2</b>		0,0045	0,0164	0,0333	0,0536	0,0758	0,0988
<b>3</b>		0,0002	0,0011	0,0033	0,0072	0,0126	0,0198
<b>4</b>			0,0001	0,0002	0,0007	0,0016	0,0030
<b>5</b>					0,0001	0,0002	0,0004
$k$	$\lambda$	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>	<b>2,0</b>	<b>3,0</b>
<b>0</b>		0,4966	0,4493	0,4066	0,3676	0,1353	0,0498
<b>1</b>		0,3476	0,3595	0,3659	0,3679	0,2707	0,1494
<b>2</b>		0,1217	0,1438	0,1647	0,1839	0,2707	0,2240
<b>3</b>		0,0284	0,0383	0,0494	0,0613	0,1804	0,2240
<b>4</b>		0,0050	0,0077	0,0111	0,0153	0,0902	0,1680
<b>5</b>		0,0007	0,0012	0,0020	0,0031	0,0361	0,1008

**Пример.** Вероятность искажения одного символа при передаче сообщения по линии связи равна **0,001**. Сообщение считают принятым, если в нём отсутствуют искажения. Найти вероятность того, что будет принято сообщение, состоящее из **20** слов по **100** символов каждое.

**Решение:** Обозначим через  $A$  событие вероятность которого требуется найти в задаче.

Переформулируем задачу в терминах схемы Бернулли  $n = 2000$  - **количество символов в сообщении;**

**успех:** символ не искажается,  $p = 0,001$  -  
вероятность успеха;  $m = 0$   $P_{2000}(0) - ?$

Вычислим  $P_{2000}(0)$

$$\lambda = np = 2$$

$$P_{2000}(0) = \frac{2^0}{0!} \cdot e^{-2} = 0,1353$$

или с помощью таблицы.

**Пример.** Известно, что процент брака для некоторой детали равен 0,5%. Контролер проверяет 1000 деталей. Какова вероятность обнаружить ровно 3 бракованные детали? Какова вероятность обнаружить не меньше трех бракованных деталей?

**Решение.** Имеем 1000 испытаний Бернулли с вероятностью «успеха»  $p = 0,005$ . Применяя пуассоновское приближение с  $\lambda = np = 5$ :

$$1. P_{1000}(3) \approx \frac{5^3}{3!} e^{-5} \approx 0,14;$$

$$\begin{aligned} 2. P_{1000}(m > 3) &= 1 - P_{1000}(m < 3) = \\ &= 1 - [P_{1000}(0) + P_{1000}(1) + P_{1000}(2)] \approx \\ &\approx 1 - \sum_{m=0}^2 \frac{5^m}{m!} \cdot e^{-5} \approx 0,875. \end{aligned}$$

**Ответ:** вероятность обнаружить ровно 3 бракованные детали равна 0,14;  
обнаружить не менее 3-х бракованных деталей 0,875.

**Пример** (задача С. Пепайса). Пепайс предложил Ньютону следующую задачу. Какое из событий более вероятно:

- $A = \{ \text{появление по крайней мере одной шестерки при подбрасывании 6 костей} \}$ ,
- $B = \{ \text{появление хотя бы двух шестерок при подбрасывании 12 костей} \}$  и
- $C = \{ \text{появление не менее трех шестерок при бросании 18 костей} \}$ ?

**Решение.** Проще найти вероятности противоположных событий, а затем их сравнить.

Для их нахождения воспользуемся теоремой

Пуассона:

$$P(\bar{A}) = P_6(0) \approx \frac{\lambda^0}{0!} \cdot e^{-\lambda} = \frac{1}{e},$$

$$\text{где } \lambda = np = 6 \cdot \frac{1}{6} = 1$$

$$P(\bar{B}) = P_{12}(0) + P_{12}(1) \approx \frac{\lambda^0}{0!} \cdot e^{-\lambda} + \frac{\lambda^1}{1!} \cdot e^{-\lambda} = \frac{3}{e^2},$$

$$\text{где } \lambda = 12 \cdot \frac{1}{6} = 2$$

$$\begin{aligned} \dot{P}(\bar{C}) &= P_{18}(0) + P_{18}(1) + P_{18}(1) \approx \frac{\lambda^0}{0!} \cdot e^{-\lambda} + \\ &+ \frac{\lambda^1}{1!} \cdot e^{-\lambda} + \frac{\lambda^2}{2!} \cdot e^{-\lambda} = e^{-3} + 3e^{-3} + \frac{9}{2}e^{-3} = \frac{17}{2}e^{-3}, \end{aligned}$$

где  $\lambda = 18 \cdot \frac{1}{6} = 3$

Отсюда:  $P(\bar{A}) < P(\bar{B}) < P(\bar{C})$  или

$1 - P(\bar{A}) > 1 - P(\bar{B}) > 1 - P(\bar{C})$  то есть

$$\mathbf{P(A) > P(B) > P(C)}$$



# Рекомендации по применению приближённых формул, выбор осуществляется по числам $\lambda$ и $n$

Формула	Формула Пуассона	Формула Муавра-Лапласа
$n < 10$	$\lambda \leq 2$	$\lambda > 2$
$10 \leq n \leq 20$	$\lambda \leq 3$	$\lambda > 3$
$20 \leq n \leq 100$	$\lambda \leq 5$	$\lambda > 5$
$100 \leq n \leq 1000$	$\lambda \leq 10$	$\lambda > 10$
$n > 1000$	$\lambda \leq \frac{1}{2}\sqrt{n}$	$\lambda > \frac{1}{2}\sqrt{n}$