



Національний технічний університет  
України  
«Київський політехнічний інститут»

---

# Методи аналізу ризику та надійності атомних електричних станцій. Вступне заняття.

Підготував:  
асист. каф АЕС і  
ІТФ  
Серафим Р.І.

---



Теплоенергетичний  
факультет  
Кафедра АЕС і ІТФ

# Предмет курсу

**ІАБ** - імовірнісний аналіз  
безпеки

**ВАБ** - вероятностный анализ  
безопасности;

**PSA** - probabilistic safety assessment

# Безпека АЕС

**властивість не перевищувати встановлені межі радіаційного впливу**

**на**

**персонал, населення і навколишнє природне середовище**

**при**

**нормальній експлуатації АС,  
порушеннях нормальної експлуатації  
і проектних аваріях,**

**а також**

**обмежувати радіаційний вплив  
при запроектних аваріях.**

# В ІАБ аналізуються

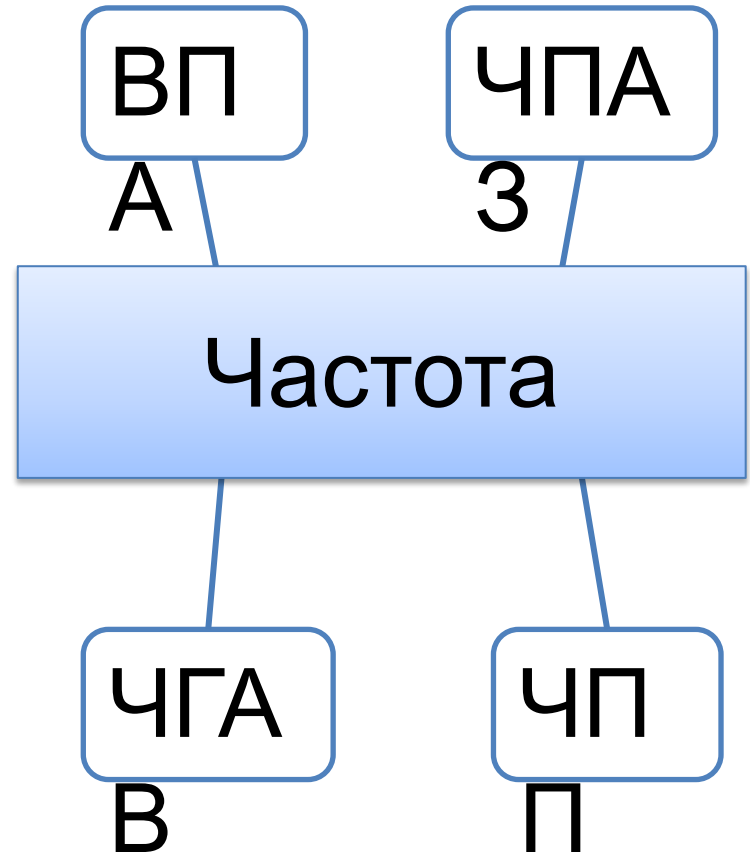
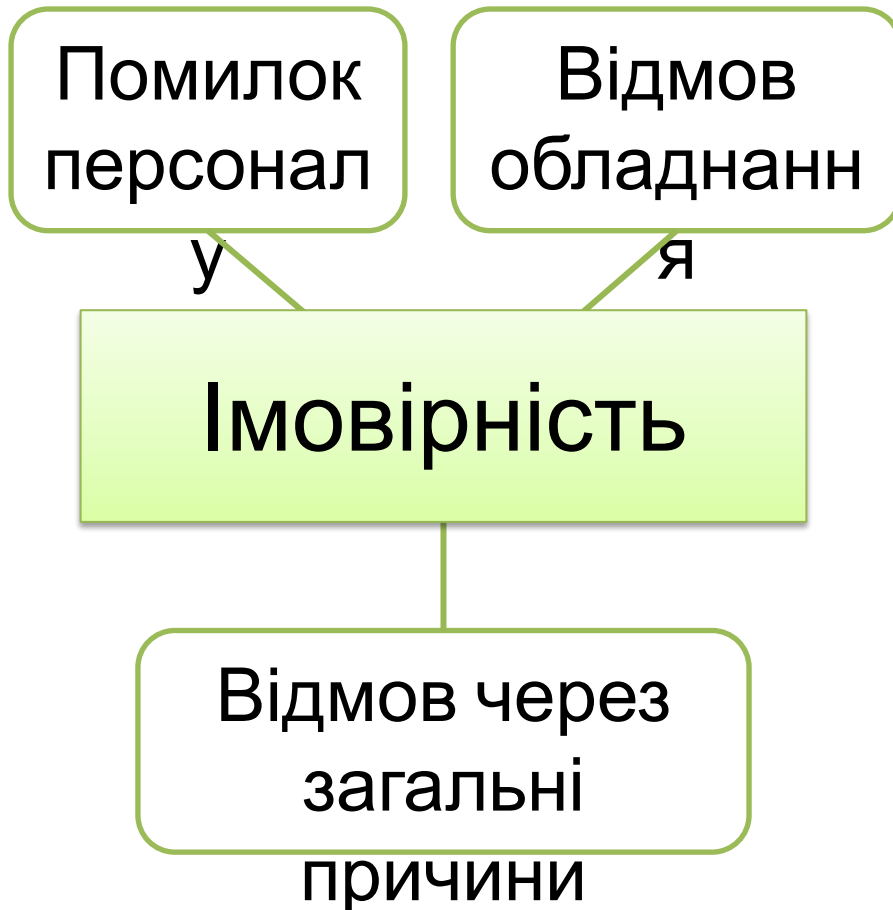
- Аварії, які можуть призвести до пошкодження активної зони реактора, а також пошкодити захисну оболонку РУ, і таким чином становлять найбільшу потенційну небезпеку.
- Шляхи розвитку аварій (в залежності від відмов обладнання, помилок персоналу)

# ІАБ дає відповідь на питання

- Що може піти не так  
(призвести до аварії,  
пошкодження активної зони /  
захисної оболонки РУ)?

# ІАБ дає відповідь на питання

- Яка імовірність/частота цього?



# Аналізи безпеки

## Детерміністичний

*аналіз безпеки енергоблоку, при визначених*

- експлуатаційних станах,
- вихідних подіях,
- аварійних умовах і
- шляхах перебігу аварії

*та співставлення  
результатів аналізу з  
проектними межами.*

## Імовірнісний

*метод **кількісної і якісної**  
оцінки, що використовується  
для*

### **аналізу**

- імовірності виникнення аварій,
- шляхів розвитку аварій;

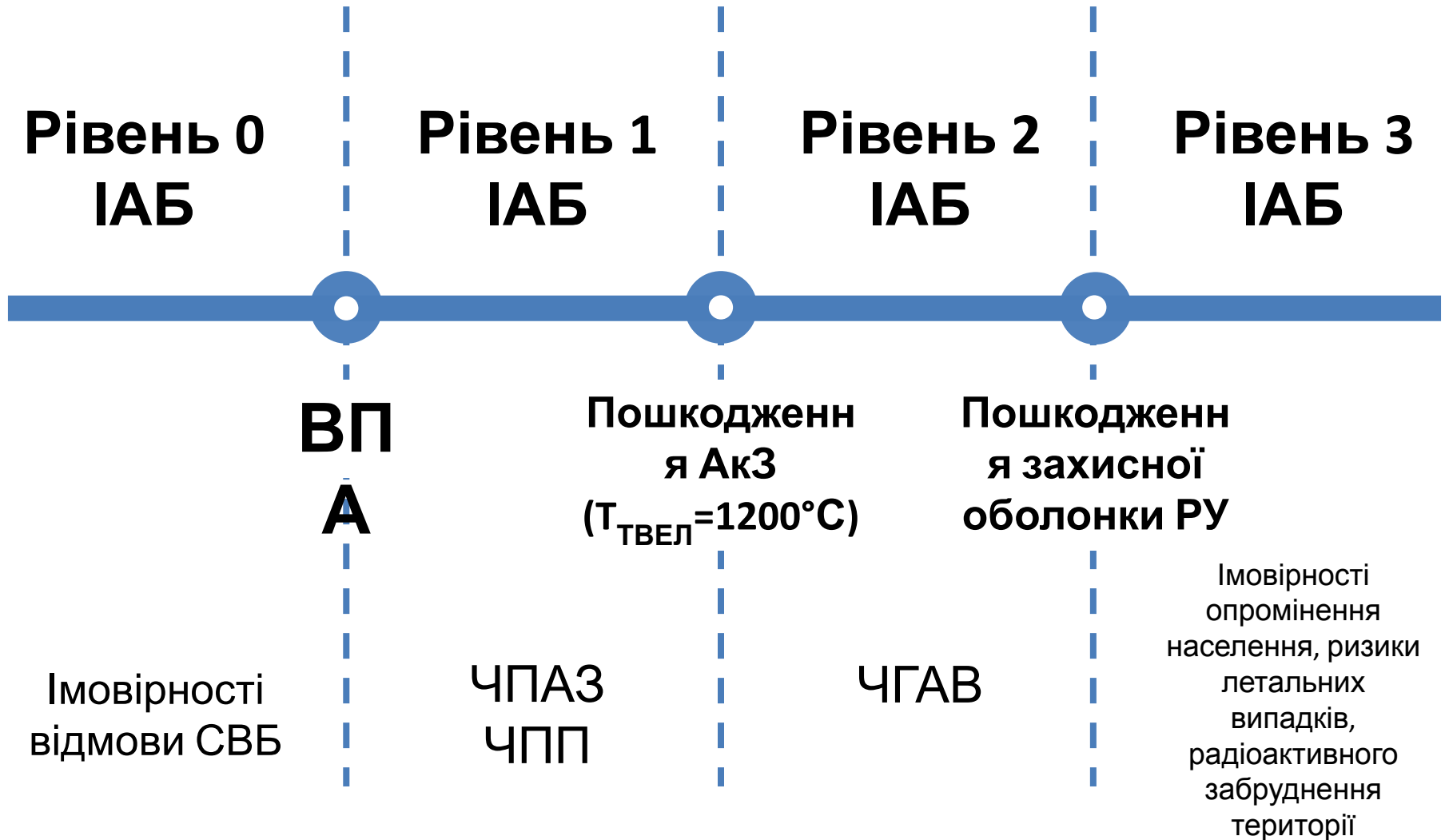
### **визначення**

- частоти пошкодження  
активної зони реактору,
- граничного аварійного викиду

### **оцінки**

- радіаційного впливу на  
населення.

# Рівні ІАБ





# Рівні ІАБ

- **Рівень 0 (ІАБ-0):** Аналіз надійності систем важливих для безпеки.
- **Рівень 1 (ІАБ-1):** Аналіз охоплює стани РУ від настання ВПА до пошкодження активної зони реактора. Визначає частоту пошкодження активної зони (ЧПАЗ).
- **Рівень 2 (ІАБ-2):** Аналіз охоплює стани РУ від пошкодження активної зони реактора до пошкодження захисної оболонки РУ. Визначає кількість продуктів радіоактивного розпаду, які викидаються при пошкодженні/руйнуванні активної зони РУ та частоту граничного аварійного викиду (ЧГАВ).
- **Рівень 3 (ІАБ-3):** Аналіз починається від пошкодження захисної оболонки РУ, закінчується оцінкою ризику для здоров'я населення ризиків забруднення ґрунту, продуктів харчування тощо. Містить аналіз розповсюдження радіоактивних речовин при важкій аварії в залежності від метеорологічних, кліматичних та ін. умов протікання аварії. Результати ІАБ-3 використовують для розробки плану заходів по захисту населення при важких аваріях.
- **"Living PSI" - "живий ІАБ"** – ІАБ, що періодично оновлюється з урахуванням змін, які вносяться на блоці під час ремонтів та технічних

# Вихідна подія аварії

порушення роботи (відмова) системи (елемента) АС або помилка персоналу, а також зовнішні чи внутрішні впливи (пожежі, затоплення, землетруси...), які призводять до порушення нормальної експлуатації, або меж/умов безпечної експлуатації.

## Приклади ВПА:

- Теча 1-го контуру;
- Теча із 1-го в 2-й контур (розрив трубки ПГ, колектора ПГ);
- Теча 2-го контуру (розрив паропроводу ПГ, течя трубопроводу подачі живильної води, заклинювання ШРУ-А);
- Спрацювання АЗ реактору;
- Знеструмлення енергоблоку...

# Імовірнісні критерії безпеки

Критерій	Енергоблоки	Не перевищувати	Прагнути
<b>ЧПАЗ</b>	діючі енергоблоки	$\leq 10^{-4}$ 1/реактор·рік	$\leq 10^{-5}$ 1/реактор·рік
	енергоблоки, що проектуються	$\leq 10^{-5}$ 1/реактор·рік	$\leq 5 \cdot 10^{-6}$ 1/реактор·рік
<b>ЧГАВ</b>	діючі енергоблоки	$\leq 10^{-5}$ 1/реактор·рік	$\leq 10^{-6}$ 1/реактор·рік
	енергоблоки, що проектуються	$\leq 10^{-6}$ 1/реактор·рік	$\leq 10^{-7}$ 1/реактор·рік

Дані взяті із розділу 4.1 НП 306.2.141-2008 «Загальні положення безпеки атомних станцій».

# Сфера виконання ІАБ

## Експлуатаційні стани РУ:

- Номінальний рівень потужності;
- Знижений рівень потужності;
- Стан зупину.

**Інтегральний  
ІАБ**

## Ядерні об'єкти:

- Реакторна установка;
- Басейн витримки;
- Сховище ВЯП.

## Внутрішні та зовнішні впливи:

- Внутрішні ВПА (ІАБ для внутрішніх ВПА);
- Пожежі (ІАБ пожеж);
- Затоплення (ІАБ затоплень);
- Землетруси (Сейсмічний ІАБ);
- ІАБ зовнішніх екстремальних впливів (смерчі, повені...);
- ІАБ старіння.

**ІАБ  
повного  
спектру**

# Напрямки застосування ІАБ

- оцінка збалансованості проекту, обґрунтування рішень у процесі проектування;
- підтримка експлуатації енергоблоку: обґрунтування періодичності випробувань, технічного обслуговування, планування ремонтів...
- виявлення та пріоритизація проблем безпеки;
- оцінка та обґрунтування коригувальних заходів, модернізацій;
- підтримка регулюючої діяльності.

# Застосовність отриманих знань

- Розширення перспектив з вибору майбутньої діяльності
- Широке розповсюдження (ЗАБ, оцінка модернізацій, роботи з оновлення, експертиза ІАБ)
- Нові роботи (сейсмічний ІАБ, ІАБ старіння, планування ТО, ІАБ 3 рівня, Dynamic PSA)
- Системне мислення
- ІАБ монітор на БЩУ

# Структура курсу

- **8 пар**
- **6 лабораторних робіт (30 балів)**
  - Дерева подій (8)
  - Дерева відмов (8)
  - Базисні події (4)
  - Мінімальні перерізи (4)
  - Аналіз значимості (4)
  - Вихідні події аварії (2)
- **Курсова робота (20 балів)**

# Література

- Бегун В.В., Горбунов О.В., Каденко І.М., Письменний Е.М., та ін. Імовірнісний аналіз безпеки АЕС. Київ, 2000.
- Описания систем важных для безопасности АЭС с реактором ВВЭР-1000. Електронний навчальний посібник, ред. Бегуна В.В., НТУУ «КПІ», ТЕФ, 2009.
- <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6952/>
- <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr7039/>



# Додаткові відомості

# Частота

- Частота – це число подій в одиницю часу;

У рамках ІАБ оцінюється:

- частота вихідних подій аварій (ВПА);
- частота пошкодження активної зони (ЧПАЗ);
- частота граничного аварійного викиду (ЧГАВ).

# Визначення імовірності

**Імовірність** ( $p$ , **probability**) - ступінь (*міра, кількісна оцінка*) можливості настання деякої події\*.

\*Будь-який результат експерименту (випробування) (випадіння "орла" або "решки", результат кидання кубика, відмова або успішний запуск насосу...) у теорії імовірностей прийнято називати **подією**.

# Розрахунок імовірності

## • Емпіричний підхід.

- Імовірність настання події  $A$  ( $P(A)$ ) визначається наступним чином:

$$P(A) = \frac{N_A}{N}$$

де  $N_A$  – кількість раз настання події  $A$ ;

$N$  – загальна кількість експериментів (випробувань, спостережень).

- Строго, наведене відношення повинно бути оцінене з використанням границі, де кількість експериментів  $N$  прямує до нескінченності:

$$P(A) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N}$$

- Відповідно, чим більше  $N$ , тим точніше значення  $P(A)$ .

# Розрахунок імовірності

**Суб'єктивний підхід (підхід "ступені переконання").**

- Визначає імовірність  $P(A)$  як величину невизначеності або ступені переконання, яку кожен "суб'єкт" має відносно події  $A$ .
- Наприклад, на основі знання симетрії монети, можна постулювати те, що імовірність випадіння "решки" при підкиданні дорівнює 0,5.

# Властивості імовірностей

- Імовірність будь-якої випадкової події  $P(A)$  знаходиться в інтервалі:

$$0 \leq P(A) \leq 1.$$

- Якщо імовірність події  $A$  дорівнює нулю ( $P(A)=0$ ), то таку подію називають **неможливою**.  
*Наприклад, випадання при киданні одного кубика числа більше 6.*
- Якщо імовірність події  $A$  дорівнює одиниці ( $P(A)=1$ ), то таку подію називають **достовірною**.  
*Наприклад, випадання при киданні кубика числа від 1 до 6.*
- Подія, яка полягає в тому, що подія  $A$  **не** відбувається, називається **протилежною** до події  $A$  (або **запереченням** події  $A$ ) і **позначається  $\bar{A}$** .  
*Наприклад подія "запуск насосу" протилежна події "відмова на запуск насосу".*  
 $P(\bar{A})$  – імовірність того, що подія  $A$  не відбудеться.

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1;$$

- $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$ .  
*Наприклад, якщо  $P(A)$  – імовірність випадання числа 1 при киданні кубика, тоді  $(1-P(A))$  – імовірність випадіння чисел від 2*

# Приклад: Кидання кубика

- Маємо кубик із числами від 1 до 6 на його гранях.
- Якщо кубик виготовлений без дефектів, тоді можна сказати, що кожна із його сторін має однакові шанси на випадання.



- Як ви думаєте, яка імовірність випадання одної з граней?
- Імовірність випадання для всіх сторін однакова і дорівнює:

$$P(\text{випадання грані із числом } N) = \frac{\text{кількість граней із числом } N}{\text{загальне число граней}}$$

- Наприклад:

$$P(2) = \frac{1}{6} = 0,1667 = 16,67\%$$

# Розподіл імовірностей для кубика

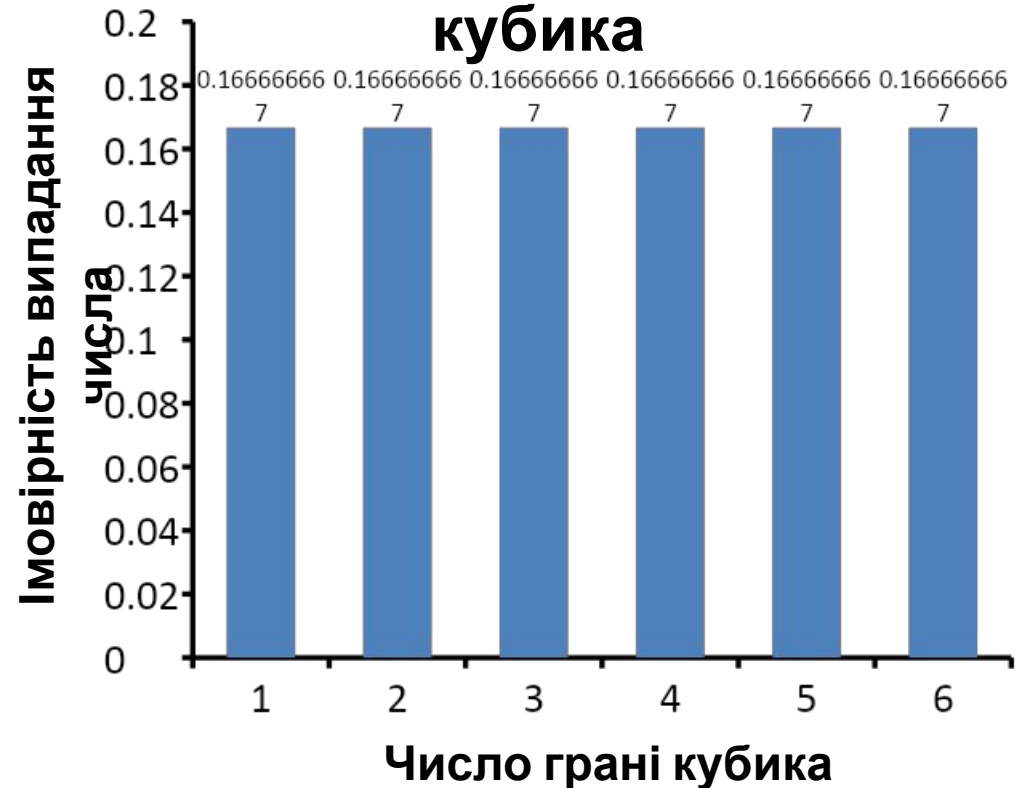
- При використанні одного кубика імовірності випадання кожної із його сторін розподілені рівномірно.

- Сума всіх імовірностей

дорівнює одиниці.

$$P(\text{загальна}) = \sum_{i=1}^6 \frac{1}{6} = 1$$

## Розподіл імовірностей для кубика





# Приклад: Кидання двох кубиків

- Маємо два кубики із числами від 1 до 6 на їх гранях.
- Кубики виготовлені без дефектів, тому кожна з граней має однакові шанси на випадання.
- Для одного кубика кількість можливих комбінацій випадання дорівнює 6.
- Для двох кубиків ми повинні уже враховувати суму чисел, що випали на кожній із граней. Таким чином, кількість можливих комбінацій дорівнює  $6 \times 6 = 36$ , а можливі варіанти чисел які випадуть: від 2 до 12.
- Як ви думаєте для якого з чисел (від 2 до 12) імовірність випадання буде **найбільшою**.



?

# Можливі комбінації випадання двох кубиків

		Кубик А					
		1	2	3	4	5	6
К У Б И К Б	1	2	3	4	5	6	7
	2	3	4	5	6	7	8
	3	4	5	6	7	8	9
	4	5	6	7	8	9	10
	5	6	7	8	9	10	11
	6	7	8	9	10	11	12

- **Яка імовірність випадання 7?**
- Число сім має найбільше комбінацій випадання, а отже і найбільшу імовірність, яка дорівнює:

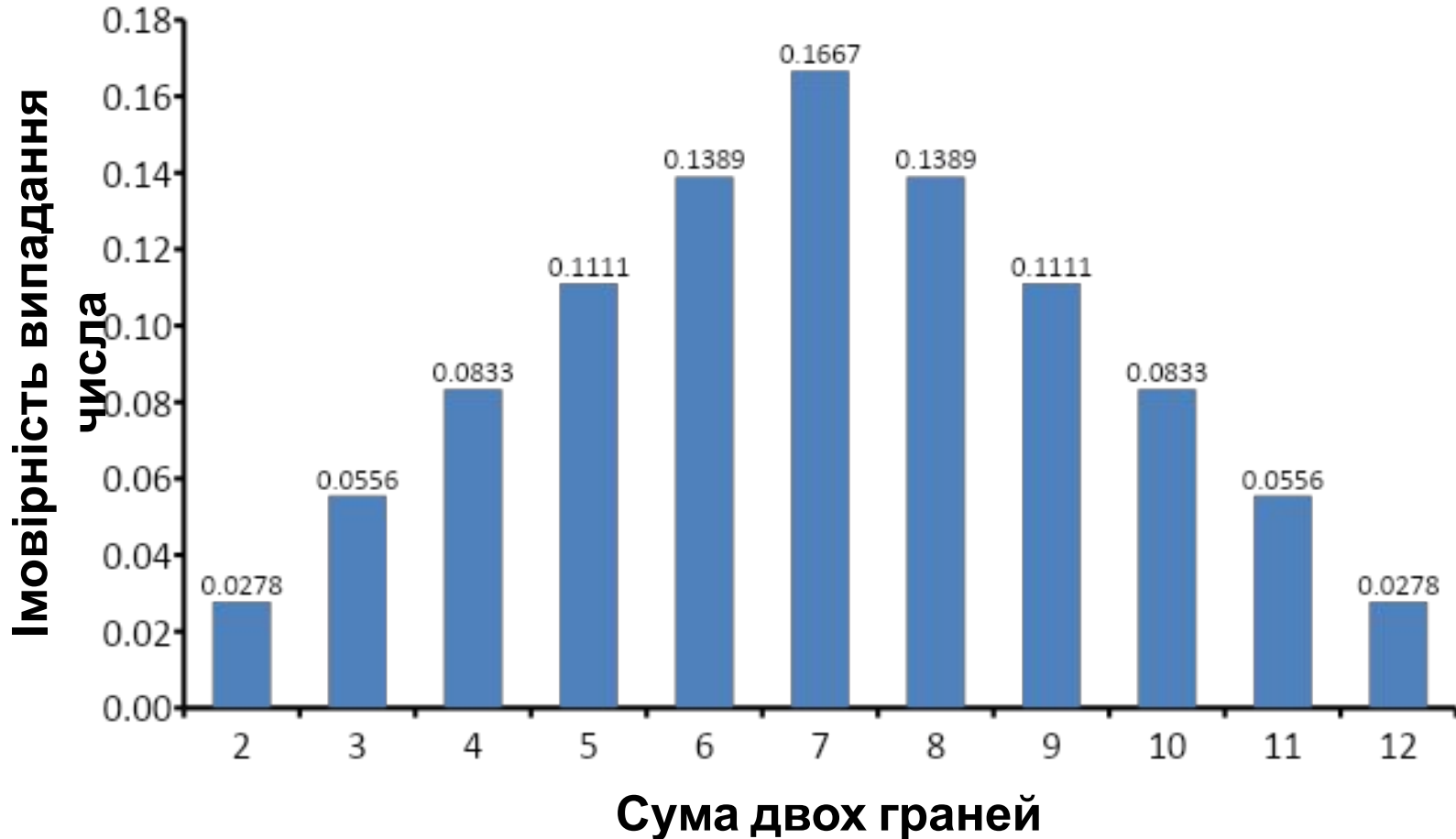
$$P(7) = \frac{6}{36} = \frac{1}{6} \cong 0,1667$$

- Тобто, ви маєте шанс 16,67% викинути 7.
- **Яка імовірність випадання 2 і 12?**
- Числа 2 і 12 мають найменше комбінацій випадання, а отже і найменшу імовірність, яка дорівнює:

$$P(2,12) = \frac{1}{36} \cong 0,0278$$

- Ваші шанси викинути 2 або 12 становлять 2,78 %.

# Розподіл імовірностей для двох кубиків



# Випадкові величини

- **Випадкова величина** це величина для якої, ми не можемо заздалегідь вказати значення, які вона прийме, хоча, з іншого боку, множина її можливих значень вважається відомою.
- Для того, щоб дослідити випадкову величину, потрібно знати ті значення, які вона може приймати, а також як часто, тобто з якою імовірністю вона приймає ці значення.

# Випадкові величини

## Дискретні

Величина  $X$  називається **дискретною випадковою величиною**, якщо

- множина її можливих значень являє собою кінцеву чи нескінченну послідовність чисел  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots$
- та кожна подія  $X=x_i$  має певну імовірність  $p_i$
- (події  $X=x_i$  називаються *елементарними*)

**Прикладом дискретної випадкової величини** є величина  $X$ , яка визначає:

- кількість випадань "орла" серед  $N$  підкидань монети;
- кількість випадань парних чисел

## Неперервні

Величина  $X$  називається **неперервною випадковою величиною**, якщо імовірність потрапляння її значення в будь-який інтервал  $(x_1, x_2)$  може бути представлена у вигляді інтегралу деякої функції  $p(x)$ :

$$P(x_1 < X < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx$$

**Прикладом неперервної випадкової величини** є величина  $X$ , яка визначає:

- діапазон тисків за яких може відбутися розрив трубопроводу високого тиску.

# Дискретна випадкова величина

- Будь-яке правило, яке дозволяє знаходити всі імовірності  $P(X=x_i)=p_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) дискретної випадкової величини  $X$ , називається **законом розподілу імовірностей** випадкової величини  $X$ .
- Закон розподілу зазвичай задається
  - або формулою, яка виражає імовірності  $p_i$  через функцію від  $x_i$ ,
  - або таблицею, в якій перераховуються всі можливі значення величини  $X$  і їх імовірності:

Можливе значення $X$	$x_1$	$x_2$	$\dots$	$x_i$	$\dots$
Імовірність	$p_1$	$p_2$	$\dots$	$p_i$	$\dots$

# Дискретна випадкова величина

- Якщо випадкова величина  $X$  може приймати лише кінцеве число різних значень  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i \dots$  то елементарні події  $X = x_1, X = x_2, X = x_3, \dots, X = x_i \dots$  утворюють повну групу попарно несумісних випадкових подій, і тому сума їх імовірностей дорівнює одиниці

$$p_1 + p_2 + \dots + p_i = 1$$

- Якщо множина можливих значень величини  $X$  нескінченна, то ми замінимо умову вказану вище наступною:
  - Нескінченний ряд  $\sum_{i=1}^{\infty} p_i = p_1 + p_2 + \dots$  повинен бути таким, що сходиться, і його сума повинна дорівнювати 1

# Неперервна випадкова величина

- У теорії імовірностей часто доводиться мати справу із такими випадковими величинами, можливі значення яких повністю заповнюють деякий інтервал.
- При цьому закон розподілу імовірностей величини  $X$  повинен дозволяти знаходити імовірності  $P(x_1 < X < x_2)$  потрапляння її значень в будь-який інтервал  $(x_1, x_2)$ .
- **Густиною розподілу імовірностей (Probability Density Function (PDF))** величини  $X$  називається функція:

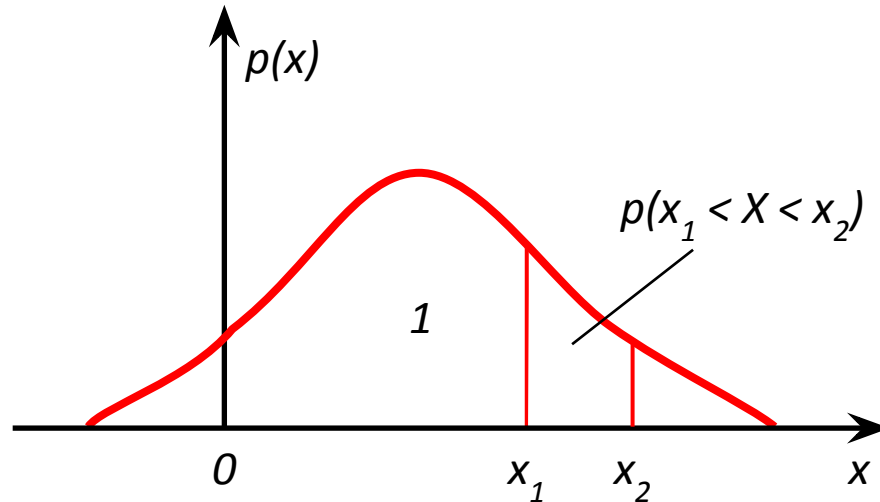
$$p(x) = \lim_{dx \rightarrow 0} \frac{P(x < X < x + dx)}{dx}$$

де  $P(x < X < x + dx)$  – імовірність потрапляння величини  $X$  у нескінченно малий інтервал  $(x, x + dx)$ .



# Неперервна випадкова величина

- Графік густини розподілу  $p(x)$  називається **кривою розподілу імовірностей**.



- Площа криволінійної трапеції на графіку розраховується за формулою:  $P(x_1 < X < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx$
- Імовірність  $P(x_1 < X < x_2)$  дорівнює відношенню площі заштрихованої частини до площі всієї фігури, яка приймається за одиницю

# Функція розподілу імовірностей (Cumulative Distribution Function)

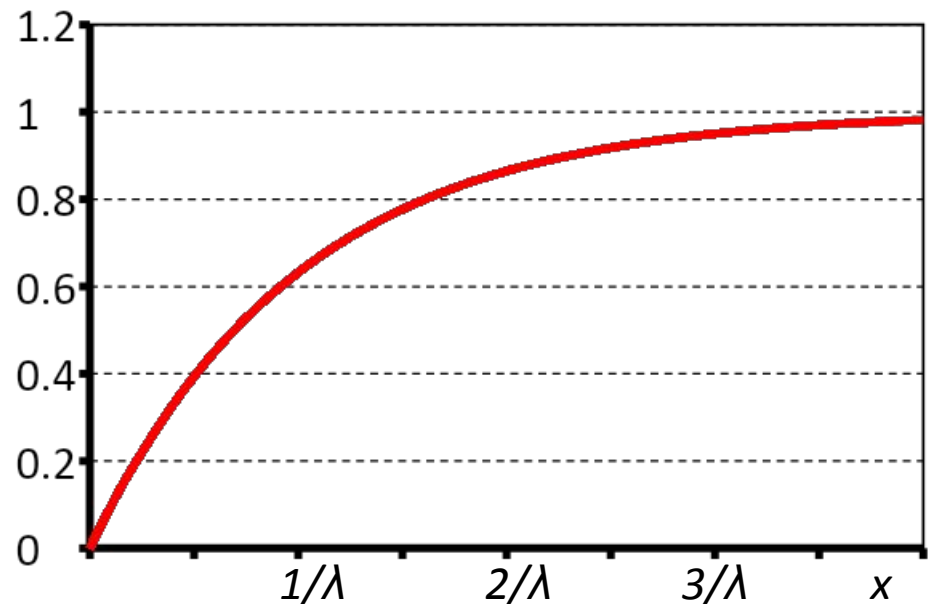
Функцією розподілу імовірності випадкової величини  $X$  називається імовірність того, що величина  $X$  прийме значення, менше деякого числа  $x$ :

$$F(x) = P(X < x)$$

Для неперервної випадкової величини  $X$ :

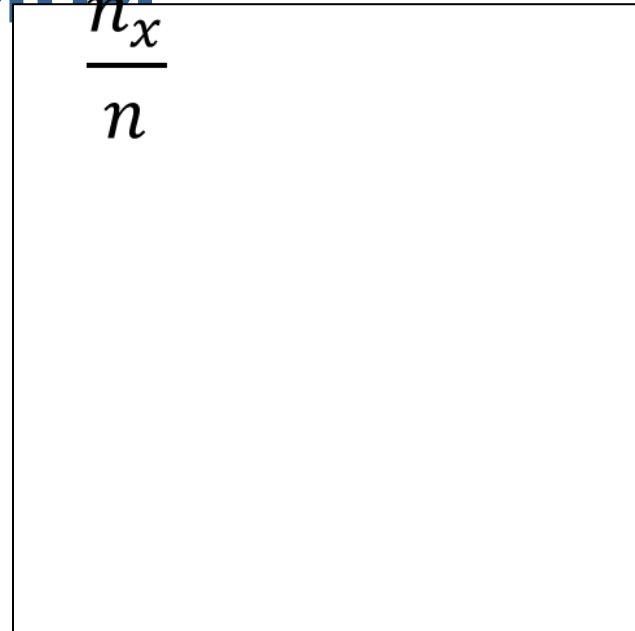
$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(x) dx$$

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (x > 0)$$



# Емпіричний розподіл неперервної випадкової величини

- Весь діапазон можливих значень випадкової величини  $X$  розбивається на рівні інтервали.
- Виконуючи серію із  $n$  випробувань, які дають емпіричні значення величини  $X$ , відмічаються числа  $n_x$  потраплянь результатів випробувань у кожний інтервал.
- Емпіричний розподіл неперервної величини  $X$**  визначає залежність частот  $n_x/n$
- Відношення площі в гистограмі (як площі прямокутників із рівними основами) пропорційні частотам потрапляння у відповідні інтервали.
- Таким чином, ми отримуємо наближене представлення кривої розподілу випадкової величини.



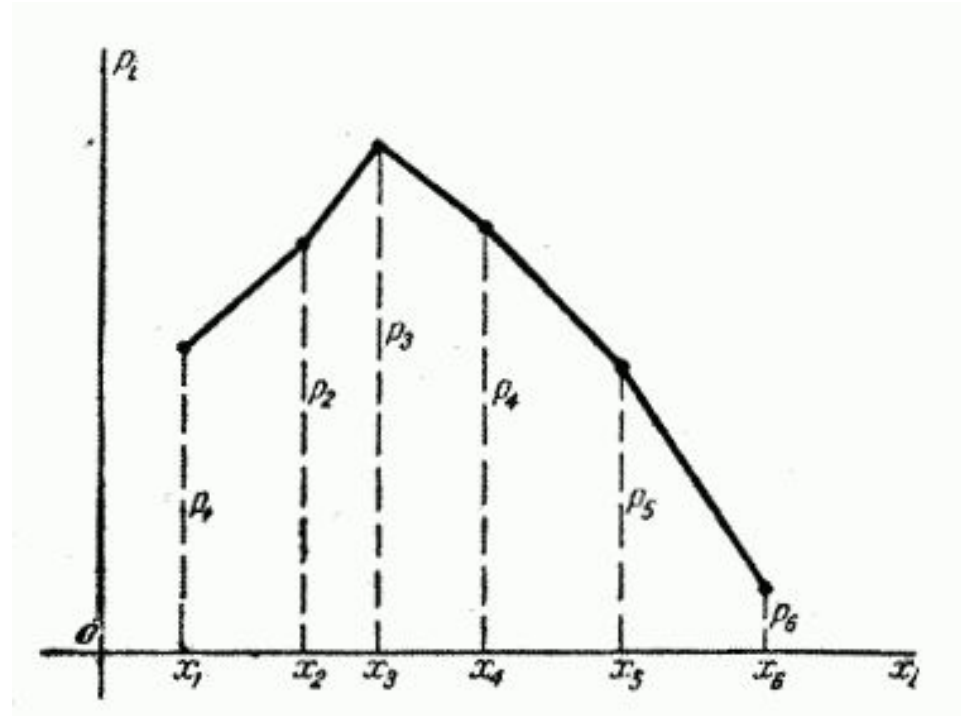
0

$X$

# Емпіричний розподіл дискретної випадкової величини

- Найбільш простою формулою закону розподілу дискретної випадкової величини  $X$  є таблиця, в якій перераховані можливі значення випадкової величини і відповідні їм імі

$x_1$	$x_1$	$x_2$	$\dots$	$x_n$
$p_1$	$p_1$	$p_2$	$\dots$	$p_n$



- Щоб надати розподілу більш наочний вигляд, часто вдаються до його графічного зображення: по осі абсцис відкладаються можливі значення випадкової величини, а по осі ординат - імовірності цих значень. Для наочності отримані точки з'єднуються відрізками прямих. Така фігура називається **багатокутником розподілу**.