# Комп'ютерне моделювання

## Лекція 1

5.09.13р

Загальна хар-ка моделювання, методів мод-ня

Модель- прагматичні знання про об'єкт і для практичного застосув

Об'єкт моделювання-оригінал

Ми завжди користуємось моделями

Щоб описати оригінал потрібно дуже багато інф-ї.

Важлива простота і адекватність моделі.

Моделюв. ком. сх.:

- з т. з. логіки функц-ня;
- з т. з. швидкодії, динамічні хар-ки;
- з т. з. надійності;
- з т. з. теплових хар-ик.

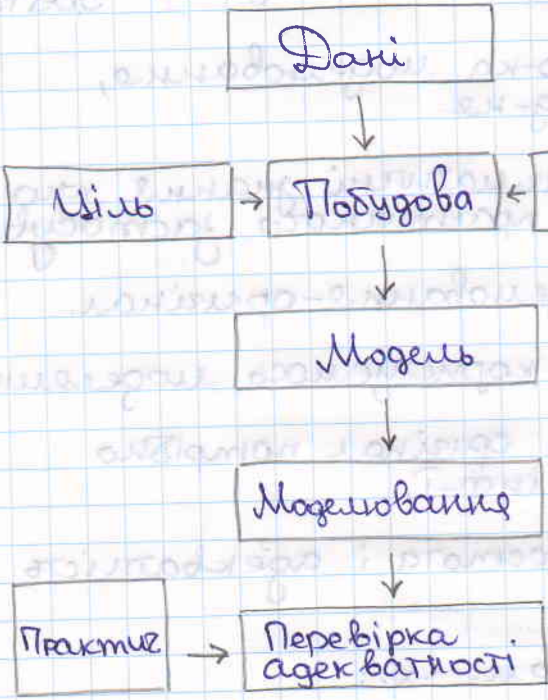
Сучасний проц.- апофіоз моделей

Хар-ки моделей

Цілі моделей:

- проектування систем,
- отримання нових знань, даних, що не можна отримати експериментально.

# Процес побудови моделі




Будь-які моделі є формальними

## Класифікація моделей

1) розумове моделювання;
2) агрегатне моделювання;
   1. натурне моделювання (в справжн розмірах);
   2. фізичне модел. (з макетами);
   3. аналогове моделюв. (різна фіз. природа, ~~рд~~ однак. властив)

~~3) аналогове моделюв.~~

3) комп'ютерне моделювання

1. імітаційне моделюв. (комп. імітує роботу реальн. о);
2. математ. моделюв. (побудова мат. моделі – формули, що описує поведінку о)
3. семантичне моделювання (створ. штучної мови, опис цією мовою о, ситучне мислення).
(розвиток напівлюдських мов – які легко компілює в дії комп'ютер?)

---

## Лабораторна робота №1

Імітаційне моделювання.

Імітування вх. сигналів – імітація випадкового вх. потоку даних.

Генерація і аналіз випадкових потоків.

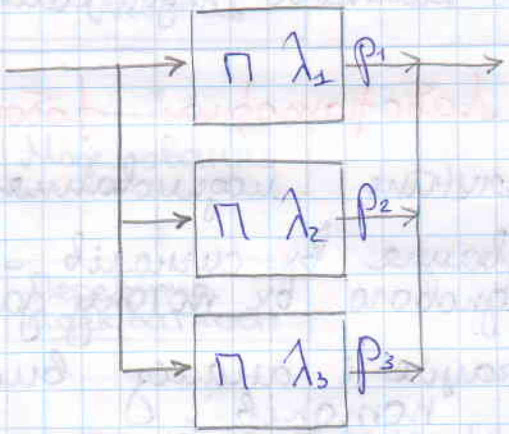
1 людина генерує потік, результат → в пам'ять. Аналіз → визнач. парам. потоку (Пуасон. потік – інтенсивн).

Відтворення → відтворити такий же потік; порівняння → відтворення адекватне

# Стандартні потоки

- Потік Пуасона (повтор.)
- Потік Ерланга (повтор.)
- Гіперекспоненційний — потоки Пуасона працюють паралельно

вх
$\lambda_1$
$\lambda_2$
$\lambda_3$
$p_1$
$p_2$
$p_3$




$p_1 + p_2 + p_3 = 1$

$0 \le r \le 1$

$$\theta = \frac{1}{\lambda_1} \ln r$$

1 число - визначає який канал працюватиме і потім генеруєм імпульс з тою інтенс, який канал працюватиме

k - к-сть каналів - сумарна к-сть дітей наших батьків

Лекція 2 12.9.13р.

(прод.)

- Потік Ерланга k-го порядку з інтенсивн. $\lambda$ — з потоку Пуасона вибираємо кожен k-ий ел. з інт $\lambda_1 = k\lambda$.

Потрібно згенер. мом. часу $t_1 t_2 t_3 \dots t_n$

$k=4,\ \lambda = 1{,}5;\ 4\lambda = 6$

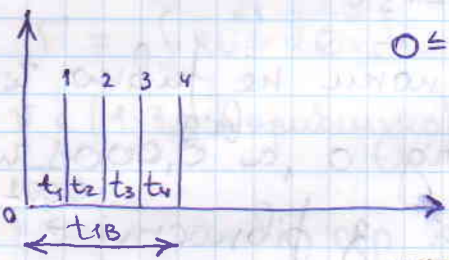
$r_1 - t_1 = \frac{1}{6}\ln r_1$ генеруємо події Пуасона

$r_2 - t_2 = \frac{1}{6}\ln r_2$

$r_3 - t_3 = \frac{1}{6}\ln r_3$

$r_4 - t_4 = \frac{1}{6}\ln r_4$

$$t_{1B} = \frac{1}{6}(\ln r_1 + \ln r_2 + \ln r_3 + \ln r_4)$$

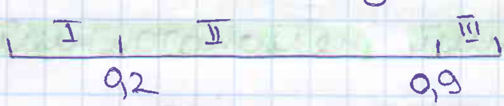



$0 \le r \le 1$ — рандомне число вбуд. генератора.

Тестув. метод Монтекарло

- Гіперекспоненційний

$0 < \xi < 1$ випадкове




$$t = -\frac{1}{\lambda_i}\ln r_i$$

$0 \le \xi, r_i \le 1$ — два різні числа зі вбуд. генератора

Середній інтервал між подіями, дисперсія потоку; теоретично і практично мають співпадати значення — завдання для генератора потоку

- **Дифузійний монотонний**

Ф-я розподілу; щільності розпод.

$$\frac{t+\xi}{2\nu \cdot \cancel{t}\sqrt{2\pi\xi t}} \cdot e^{-\frac{(t-\xi)^2}{2\nu\xi^2 t}}$$

вх. $\xi, \cancel{t}, \nu$

1. вип. число $0 \le r_i \le 1$
2. $r_i = \int_0^{t_i} \frac{t+\xi}{2\nu \cancel{t}\sqrt{2\pi\xi t}} \cdot e^{-\frac{(t-\xi)^2}{2\nu\xi t}} dt.$

$t_i \uparrow \to \int_0^{t_i} \uparrow$ поки не рівно $r_i$

інтеграл не від 0, а від 0,0001 чи 0,001

Отримуємо $t_i$ з рівності $\to$ наше випадкове число;

рівність з точністю 0,001.

- **Дифузійний немонотонний**

Ф-я розподілу

$$r_j = \int_{0{,}001}^{t_j} \frac{\sqrt{\tau}}{\nu t\sqrt{2\pi t}} \cdot e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\nu^2\tau t}} \cdot dt$$

$0 \le r_j \le 1$ генеруємо вх. $\tau, v$

$t_j \uparrow \to$ рівність.

- **логарифмічний нормальний**

$$r_i = \int_{0{,}001}^{t_i} \frac{1}{v t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \ln \xi)^2}{2v^2}} dt$$

$0 \le r_i \le 1$ ; $t_i \uparrow$ – рівність $\to t_i$

- потік **Вейбула**

вх $\xi, v$

$$r_j = \int_0^{t_j} \frac{v}{\xi} \cdot \left(\frac{t}{\xi}\right)^{v-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\xi}\right)^v} \cdot dt \, ; \quad 0 \le r_j \le 1 \to t_j$$

Сер. інт. : $\tau = \xi \Gamma\left(1 + \frac{1}{v}\right)$

$$\Gamma = \int_0^\infty u^{x-1} \cdot e^{-u} du$$

($v \in [1; 1{,}4]$ приблизно) — теоретично визначити

практично сер. інт. – сер. арифм

# Аналіз потоку

1. $t_1, t_2, t_3, \ldots, t_{100}$
інтервали між подіями.

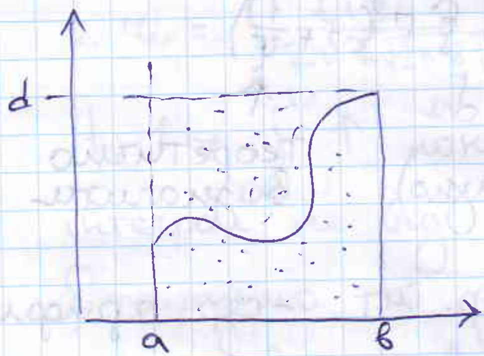
Критерій $\chi^2$ – побуд. гістограму – частота появи подій від часу.

ймов. знаходж. в кожному інтервалі

## Метод Монте Карло

$$\int_a^b f(x)\,dx$$

$\xi$ – у % к-сть точок під прямою.




$d(b-a) = S$

$I = S \cdot \xi$

генеруємо

$x \in [a, b]$,
$y \in [0, d]$

## Критерій максимуму правдоподібності

$t_1, t_2, t_3, \ldots, t_n$

заданий закон розподілу

$f(t, \xi_1 \xi_2)$

Ймов. того, що подія відбуд. ч-з час $t_j$

$$f(t_j, \xi_1 \xi_2)\cdot \Delta t$$

$$W = \prod_{j=1}^{n} f(t_j, \xi_1 \xi_2)\Delta t \;-$$

ймов. того, що з'явиться задана сукупність подій у віднов. такі моменти часу

Треба підібрати $\xi_1 \xi_2$

технічно:

$$\max_{\xi_1 \xi_2} \prod_{j=1}^{n} f(t_j, \xi_1 \xi_2)$$

## Лекція 3

13.9.13р.

# Система масового обслуговування

СМО - мат. модель о.


$\frac{1}{\mu}$; $\mu$ (-інтенсивн. на виході)

$\lambda < \mu$

$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ - загрузка СМО

$\lambda$ - вх. потік

Системи

.. \ .. / .. / ..

тип вхідн. пот — тип вих. потоку — к-сть канал. обслуг

- M – потік пуасонівський
- G – потік довільний
- D – рівномірний регулярний

M / M / 1 – без повернення – розп.

$P_0 = 1 - \rho$ – ймовірність того, що черга пуста

$P_n = \rho^n \cdot P_0 = \rho^n (1 - \rho)$ – ймов. того, що в черзі n задач

$P_{>n} = \rho^{N+1}$ – ймов., що в черзі >n задач

$m(n) = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$ – середня довжина черги

---

## Задача

Проц. розв. в середньому 1 зад/сек. M потік.,
1,25 с. $\lambda$ = [illegible]) – інтенс. вх. подієм

Визнач. довж. черги, щоб з ймов. 0,99 не сталося переповнення.

$\mu = 1$ ; $\frac{1}{\mu} = 1$ зад./сек.

$\lambda =$ $\quad 1,25 = \frac{1}{\lambda}$ ; $\frac{1}{1,25} = \frac{4}{5} = 0,8$

$\cancel{P_0} = 1 - \rho = 0$

$P_{>n} = \rho^{n+1} = 0,8^{n+1} = 0,\cancel{99}\ 0,01$

$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{0,8}{1} = 0,8$

$\ln_{0,8} 0,8^{n+1} = \ln_{0,8} 0,99$ $0,01$

$n+1 = \frac{\log_{0,8} \cancel{0,99} 0,01}{\log_{0,8} 0,8} = \frac{\log_{0,8} 0,01}{1}$ $-4,6$ $-0,22$

---

$\lambda = \frac{1}{1,25} = 0,8$ ; $\mu = 1$ $\mu > \lambda$

$0,01 = \rho^N \cdot \rho$ ; $\rho = \frac{\lambda}{\mu} = 0,8$

$\rho^n = \frac{0,01}{0,8} = 0,0125$

$0,8^n = 0,0125 \Rightarrow n \approx 19$

$m = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = \frac{0,8}{0,2} = \frac{8}{2} = 4$

Відповідь : 19

$m(t) = t_{оч} + t_{об}$

$t_{оч}$ - сер. час очікув. в черзі

$m(t)$ - сер. час обслугов.

$t_{об}$ - обробки

Якщо є 1 канал обслуг.:

$m(t) = \frac{1}{\mu - \lambda}$ - сер. час знаходж. задачі в (сист.)

Час реакції сис-ми - час знаходження в сис-мі.

## Сис-ма M/M/k

$\frac{1}{\mu}$ - час обробки задачі

$m(t) = \frac{\lambda}{k\mu - \lambda}$ - час обробки черги

---

## Задача

М, 2400л на добу; в сер. маш. обслуг. 30хв: 15 хв. їде; 15 хв чекає

К-сть автом. в парку?

Сер. час чекання на швидку 0,5год.

$\lambda = 100$ л/год

$m(t) = \frac{1}{k\mu - \lambda} = \cancel{0,5}\ \frac{1}{4}$ год $\quad \mu_1 = 2$ л/год

$$\frac{1}{k\cdot 2-100}=\frac{1}{4}, \quad 4=2k-100,$$

$$2k=104, \quad k=52 \qquad \mu k=104$$

$$m(n)=\frac{\lambda}{\mu-\lambda}=\frac{100}{104-100}=\frac{100}{4}=25$$

Відповідь: 52 машини

---

Задача

На добу розвантаж. 2400 машин, вх. потік М Пуасона.

1 амбар розвантаж. 1 маш. за 40 хв.

Скільки потрібно амбарів, щоб 1 машина знаход. в порту в сер. 1 год?

$$m(t)=\frac{1}{k\mu-\lambda}=1 \text{ год}$$

$\lambda = 100$ м/год $\quad \mu_1 = 1{,}5$ м./год

$k\mu_1$ – ?

$k = 101/1{,}5 \approx 68$ машин

Відповідь: 68 машини

Лекція 4 19.9.13р

Теорема Літла?

яка встан. відному мітс. середн. довжс. черги

$m(t)$ – сер. час перебув. в системі

$m(n) = \lambda(m(t))$

Розгл. ситуацію: вх. потік М;

потік обслуг. – довільний, для якого відомо:

- сер. час обслуг. $\tau = \frac{1}{\mu}$
- дисперсія $D$ часу обслуг.

$$D = \sigma^2 = \int_0^\infty f(t)\left(t - \frac{1}{\mu}\right)^2 dt$$

$f(t)$ – ф-я цільності часу обслугов.

1. визначити мат. очікув.
2. визначити $D$

використ. формули Палачека – Хінчена (для дов. потак.)

I. Сер. довжс. черги

$$m(n) = \frac{1}{1-\rho}\left[\rho - \frac{1}{2}\rho^2\left(1 - \mu^2\sigma^2\right)\right]$$

II. Сер. час чекання в черзі

$$m(t) = \frac{1}{2\mu(1-\rho)}\left[2-\rho\left(1-\mu^2\sigma^2\right)\right]$$

---

## Задача

Час обслуг. автом. 30 сек.
Час обслуг. людиною дов. (м) 30 сек
Відвідувач з'явл. в сер. кожні 45 с.
Сер. довж. черги для авт? люд.?

$$m(n) = \frac{1}{1-\rho}\left[\rho - \frac{1}{2}\rho^2\left(1-\mu^2\sigma^2\right)\right]$$

$\mu_a = 2$ л/хв. $\mu_л = 2$ л/хв.

$\lambda = \frac{4}{3}$ л/хв.

$1 - \frac{3}{4}$
$x \quad 1$
$\frac{4}{3}$

$$\rho_a = \frac{\frac{4}{3}}{2} = \frac{4}{6} = \frac{2}{3} = \rho_л.$$

$m(n)_a =$

$$m_л = \frac{\lambda}{\mu-\lambda} = \frac{\frac{4}{3}}{2-\frac{4}{3}} = \frac{\frac{4}{3}}{\frac{2}{3}} = \frac{\overset{2}{\cancel{4}}}{\cancel{3}}\cdot\frac{\cancel{3}}{\cancel{2}} = 2$$

$\sigma^2 = 0$ – регулярн. потік, немає відх. від сер.

$$m(n)_a = \frac{1}{1-\frac{2}{3}}\left[\frac{2}{3} - \frac{1}{2}\cdot\frac{4}{9}\left(1-4\cdot 0\right)\right] =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{3}}\left[\frac{2}{3} - \frac{2}{9}\right] = 3\left[\frac{6-2}{9}\right] = 3\cdot\frac{4}{9} = \frac{4}{3} \approx 1{,}33$$

Відповідь: $m(n)_a = 1{,}33$

$m(n)_л = 2$

автомат ефективніше.

## Задача

На вхід П – М потік задач $\lambda = 1$ з/сек

Фактично задачі двох типів:

$I$ т – $0{,}7 = P_I$ ; розв. за $0{,}5$ с

$II$ т – $0{,}3 = P_{II}$ ; розв. за $1{,}2$ с

$m(t)$ – ?

---

$1$ з – $1{,}2$ с $\quad \frac{1}{1{,}2} = \frac{10}{12}$

$x$ – $1$ с

$\mathcal{D}$ – ?

$\cancel{\mu_I = 2 \text{ з/с}}$

$\cancel{\mu_{II} = 0{,}83 \text{ з/с}}$

$\cancel{\mu = 0{,}7\mu_I + 0{,}3\mu_{II} = 1{,}4 + 0{,}249 = 1{,}65 \text{ з/с}}$ $\quad \mu > \lambda$ !

$\cancel{\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{1}{1{,}65} = 0{,}606}$

$\cancel{m(t) = \frac{1}{3{,}3(1-0{,}606)}}\left(2 - 0{,}606(1 - 1{,}65^2 \cdot \mathcal{D})\right) =$

! $\mathcal{D} = (1-\tau)^2 p_1 + (1-\tau)^2 p_2 =$

---

$\tau_c = 0{,}7 \cdot 0{,}5 + 0{,}3 \cdot 1{,}2 = 0{,}71$ (с) $\quad \mu = \frac{1}{\tau_c}$

$\mu = \frac{1}{\tau_c} = \frac{1}{0{,}71} = 1{,}41$

$\mathcal{D}$ [illegible] $= p_1(1-\tau_c)^2 + p_2(1-\tau_c)^2 = 0{,}081$

$\rho = 0{,}71$

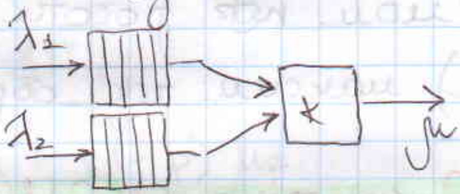
$m(t) = 3{,}2$ с – Відповідь:

# Пріоритетні черги

**Відносний пріоритет** – який впливає на вибір задачі з черги.

**Абсол. пріоритет** – впливає на перерив. тої задачі, що виконується (з меншим пріор.)

$\lambda_1 + \lambda_2 < \mu$




Тоді сер. час обслуг. в черзі (пріор. $\lambda_1$ > пріор. $\lambda_2$)

$$m_1(t) = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\mu(\mu - \lambda_1)}$$

$$m_2(t) = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{(\mu - \lambda_1)(\mu - \lambda_1 - \lambda_2)}$$

# Моделювання СМО

**Критерії ефект. СМО**

- коеф. завант. пристрою (каналу)

$\rho$ – середнє

- середня довж. черги

$m(n)$

• часові хар-ки:

а) сер. час перебув. задачі в сист.

б) дисперсія сер. часу перебув. задачі в сист.

в) час реакції системи – час від появи задачі до мом. поч. роботи.

г) максим. час обробки задачі.

## Класифікація СМО

I. СМО без черги

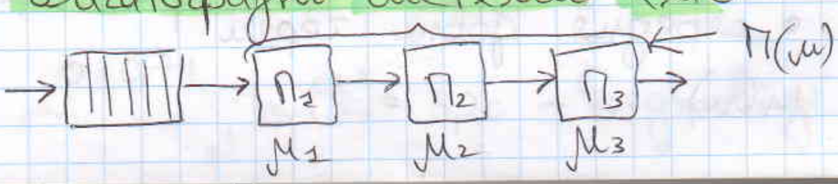
II. Класичні СМО (з чергою)

III. СМО з обмеж. часом чекання (після деякого періоду часу задача втрач. актуальн.)

## Об'єкти моделюв.:

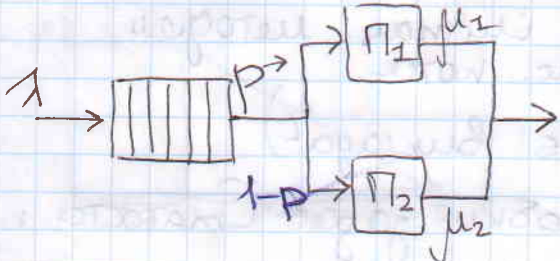
1) к-сть процесорів
2) сер. час обслугов
3) дисципл. обслуговув.

## Багатофазні системи СМО



$$\mu_3 = \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3}{\mu_1\mu_2 + \mu_1\mu_3 + \mu_2\mu_3}$$ (3 процеси)

$$\mu_2 = \frac{\mu_1\mu_2}{\mu_1+\mu_2}; \quad \mu_4 = \frac{\mu_1\mu_2\mu_3\mu_4}{\mu_1\mu_2\mu_3 + \mu_1\mu_3\mu_4 + \mu_2\mu_3\mu_4 + \mu_1\mu_2\mu_4}$$




$$\mu = p\mu_1 + (1-p)\mu_2$$

# Дисципліни обслуговування

- без переривання обслуговування
  1. FIFO
  2. LIFO (пам'ять - стек)
  3. SF (сис-ми в яких обслуг. в першу чергу ті, які мають найменший час обслуг.)
  4. LF (в першу чергу з найдовш. час. обсл.)
  5.
-

Лекція 5 20.09.13 р

# Лабораторна робота №2

Моделюємо імітац. методом вх. Пуас. потік

$\lambda$ - вх (задає викладач)

Потік обробки задає Староста:

- регулярний
- Пуасонівський
- гіперекспоненційний (порядок ≤5)
- нормальний
- рівномірний

Порядок набору можл. типів обслуговування задає Староста

- FIFO (LIFO)
- RM (регульований) - підібрати оптимальний парам. роботи

Задана цільова ф-я

$$f = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + \dots$$

$k$ - коеф. значимості крит. еф

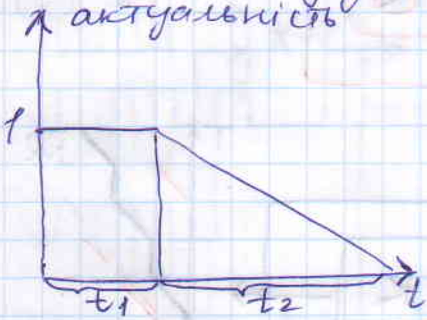
$x_1$ - сер. час знах. зад. в сист.

$x_2$ - D часу -//-

$x_3$ - час реакції системи на появу задачі

$x_4$ - віднош. к-сті оброб. задач до заг. кіль-сті задач, які прийшли

$X_5$ – сумарна оцінка актуальності обкоблених задач.



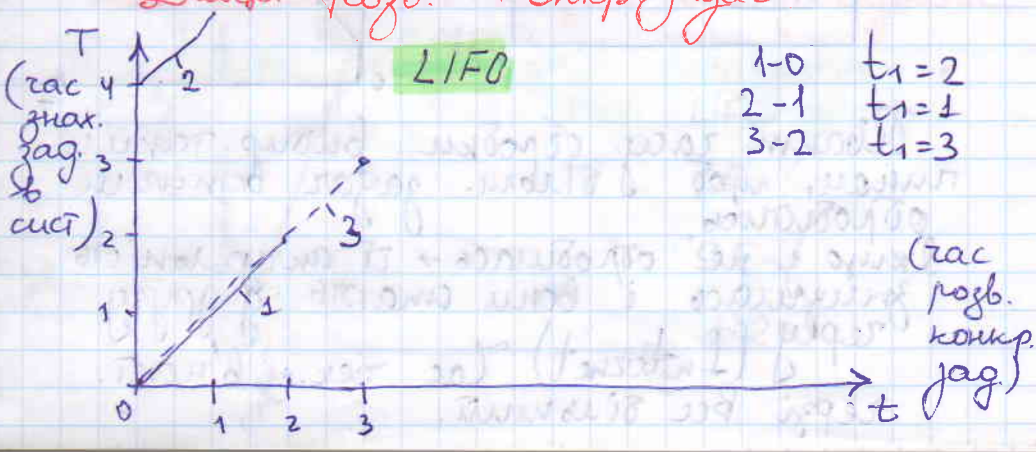

Генеруємо 1000 задач (чи зд. час)
Ввваж. є тіп 2 системи $\searrow$ к-сть-?

$\rightarrow \mu, \lambda$ ; → для консн. системи
виводимо пар-ри ефективності $X_1 - X_5$ і
заг. знач. цільової функції.

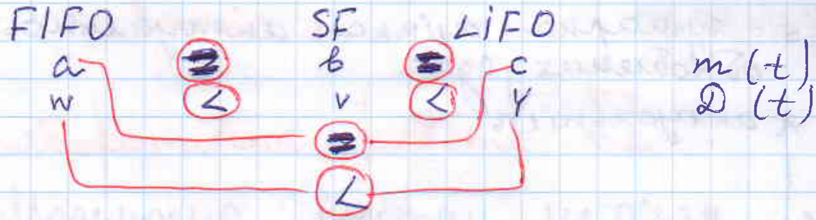
! Маніпуляції з функціями !!!

---

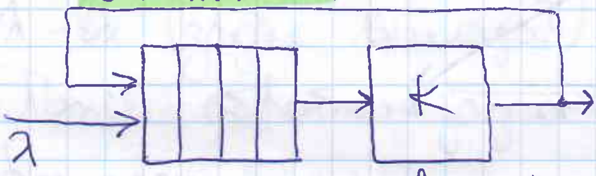
Діагр. розв. конкр. задачі

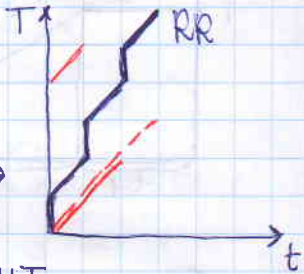



1-0 $t_1 = 2$
2-1 $t_1 = 1$
3-2 $t_1 = 3$




## Сис-ма RR

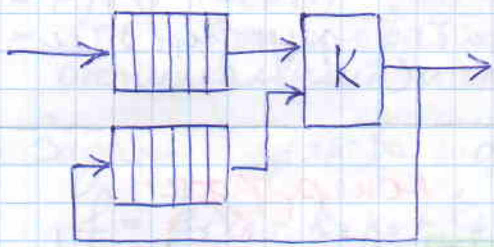


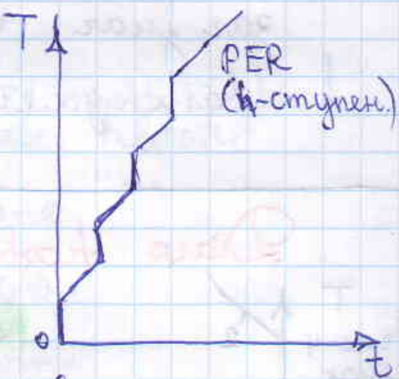




h - квант

змінювати знач. h, щоб досягти макс. ефект. системи.

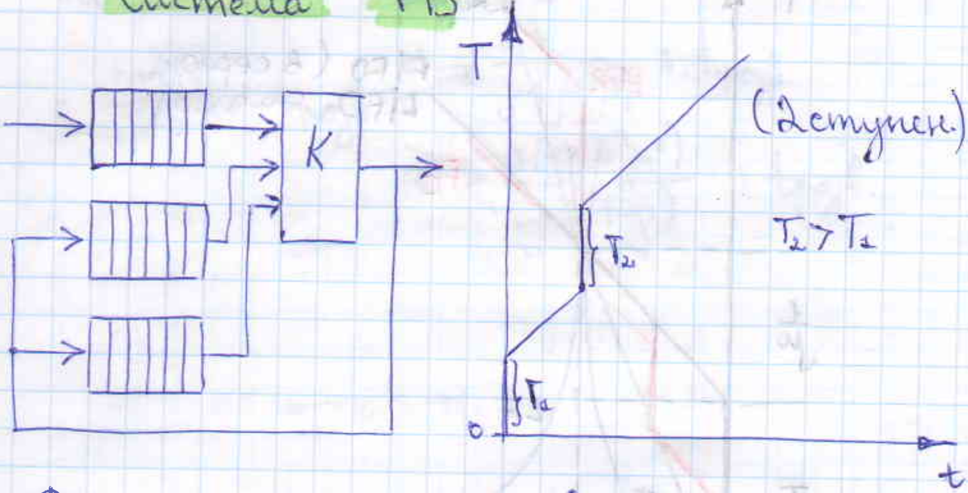
## С-ма PER




Квант часу обробки вибир. таким чином, щоб більш. задач встигли обробитись.
Якщо з не обробилась → її актуальність знизилась і вони стають в другу черу (Internet) Час чек. в наст. черзі все більший.

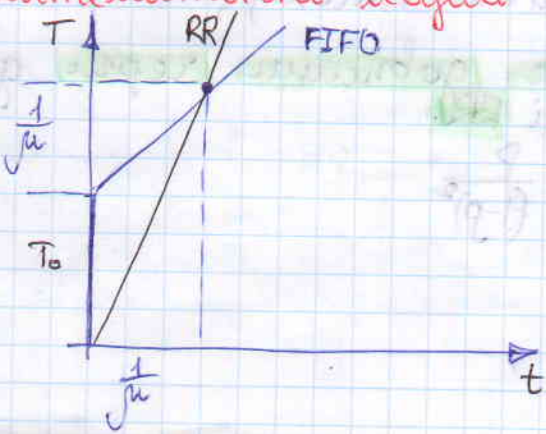
## Система FB




В другій черзі зад. в з середнім пріоритетом приходить на K і виконується якийсь квант часу і переходить в наступний пріоритетн. черги і якщо виходить з останньої черги → то задача виконується до кінця (не залежно від кванту часу).

# Лекція 6 1.10.13р.

## Математичні моделі обслуговування

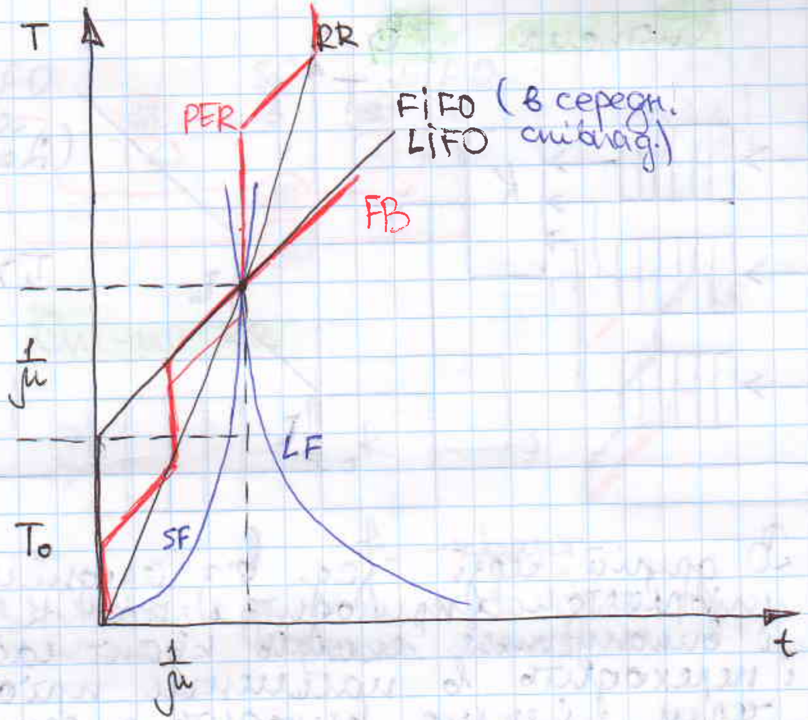



LIFO – ?

LF – ?

SF – ?

RR – ?




## Визначення середніх значень

- сер. довж. черги (М; заг. потік - Палачека-Хінчена);
- сер. час чекання в черзі (М; Палачека-Хінчена);
- дисперсія довжини черги для FIFO і RR.

$$D(n) = \frac{\rho}{(1-\rho)^2}$$

$t_{сист} = t_{оч} + t_{розв.} =$

$$= \frac{m(n)}{\mu} + t_{розв} \xrightarrow{M} \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)} + t_{розв.}$$

$$\xrightarrow{G} \frac{\rho(1+\sigma^2\mu^2)}{2\mu(1-\rho)} + t_{розв.}$$

# Задача !

$M$ ; $\mu = 20$ ; $\rho = 0{,}85$

Час розв. задачі $t = 1{,}2\,с$ ; $h = 0{,}05\,с$

Знайти: час знаходж. в сист. для FIFO і для RR; $T$ - ?

$$T = t_{оч.} + t_{розв.}$$

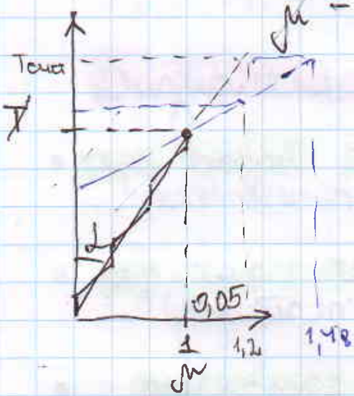
$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}, \quad \lambda = 20 \cdot 0{,}85 = 17$$

$$T_{FIFO} = t_{сист\,FIFO} = \frac{17}{20(20-17)} + 1{,}2c = 0{,}28 + 1{,}2 =$$

$$= 1{,}48\,c$$

$T_{RR}$ - ?

$$\cancel{\frac{1}{\mu} = n \cdot h, \quad n = \frac{1}{\mu \cdot h} = \frac{1}{20 \cdot 0{,}05} = 1}$$



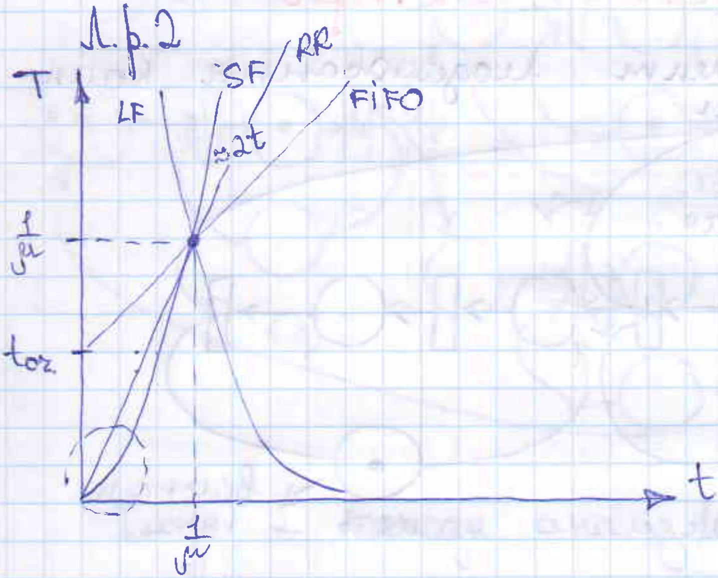

$$tg\,\alpha = \frac{\frac{1}{\mu}}{\frac{1}{\mu} + t_{оч}} = \frac{\frac{1}{\mu}}{\frac{1}{\mu} + \frac{\lambda}{\mu(\mu-\lambda)}} =$$

$$= \frac{0{,}05}{0{,}05 + \frac{0{,}15}{3}} = \frac{0{,}05}{0{,}05 + 0{,}28} = 0{,}15$$

$$tg\,\alpha = \frac{1{,}2}{t_{сист\,RR}}$$

$$t_{сист\,RR} = \frac{1{,}2}{tg\,\alpha} = \frac{1{,}2}{0{,}15} = 8$$

Лекція 7 3.10.13р




- $t_{оч.}$ M, Полачека-Хінчена, $\to \frac{1}{\mu}$ ($\mu$ - відомо)
- для SF нахил частини графіка з коеф. 2t
- RAND – нічого кращого, ніж середні знач. ми не отримаємо; нічого не можна говорити про t, T.
- один вх. потік → обробка кільк. способами за варіантом

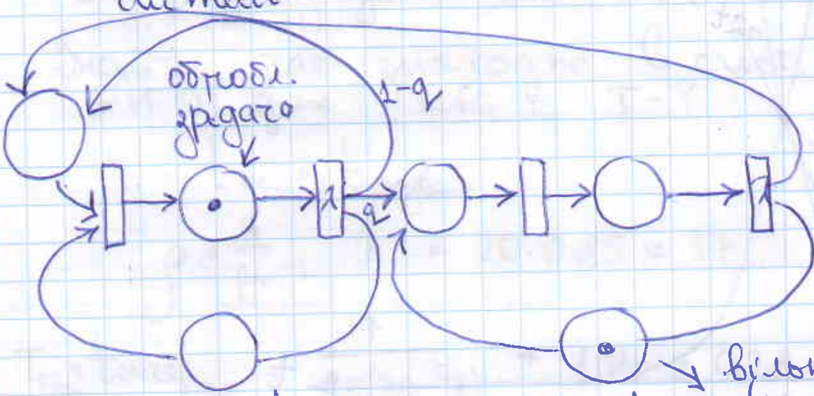
Якщо відом. довж. черги m, то мат час очікув. в черзі $m(t) = \frac{m}{\mu}$.

Ймов. того, що сист. чекатиме в черзі час $t_f$

$$P_{t_f} = 1 - \sum_{j=0}^{m-1} \frac{1}{j!} e^{-\mu \cdot t_f} (\mu \cdot t_f)^j \approx \frac{1}{2} \cdot \Phi\left(\frac{t_f - \frac{m}{\mu}}{\sqrt{\frac{m}{\mu}}}\right)$$

# Мережі Петрі

→ інструмент моделювання комп. систем




Вважаємо, що потік задач не зменшується (маємо 2 задачі)

q - ймов.

λ - часовий перехід - фіксований

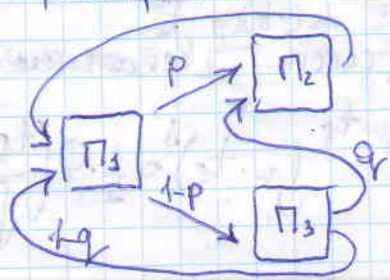
# Лекція 8

10.10.13р

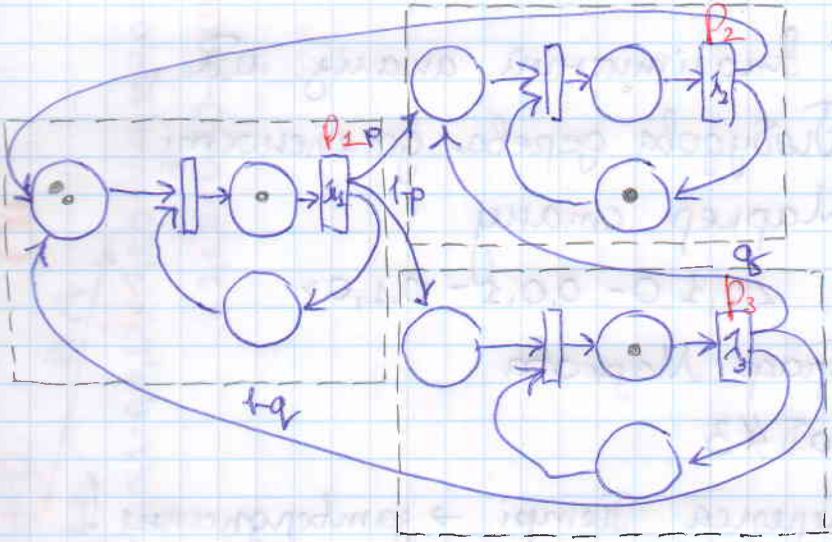
Задача

3 пристрої:

4 задачі в мережі Петрі.




Черга до П - FIFO




Приклад

$t_1 = 3$
$t_2 = 1$
$t_3 = 2$

Існує 2 методи аналіз мережі:

1. Статистичний (3 лаб.)

- Осн. рез. аналізу мер. Петрі (мП) є визнач. коеф. загрузки кожного з пристроїв
- Осн. задача - збалансув. ефект. всіх елементів системи.
- Щоб змодел. час роботи $П_1$

$t_1 = \frac{1}{\lambda_1} \ln z_1$, $z_i$ - Random

$t_2 = \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln z_2$, -״-

$t_3 = \frac{1}{\lambda_3} \cdot \ln z_3$

(2) Аналітичний аналіз м.П.
Побудова дерева досяжності
Маркер стану
<2,1,0 - 0,0,1 - 0,1,0>
Граф Маркова
Лаб№3
Мережа Петрі → затвердження!
Статист. модел.
Лаб. 4
На комп. - дерево досяжності - граф Маркова
(за природою неперервний)
Сума 1 - зайнятості процеса.

O4

$P_1, p$ <2,1,0 - 0,0,1 - 0,1,0> M1

$P_1, 1-p$ $P_3, 1-q$ $P_3, q$

~~<2,0,1 - 1,0,1 - 0,1,0>~~ | ~~<2,0,1 - 0,0,1 - 1,1,0>~~ | <3,1,0 - 0,0,1 - 0,0,1> | ~~<2,1,0 - 1,0,1 - 0,0,1>~~

M2 <1,1,0 - 0,1,0 - 0,1,0> | <1,1,0 - 0,0,1 - 1,1,0> M5 | <3,1,0 <2,1,0 - 0,1,0 - 0,0,1 M6

$P_1 p$ 1 < 0,1,0 - 1,1,0 - 0,1,0> M4 $P_1, p$ 1 < 0,1,0 - 0,1,0 - 1,1,0> M3
$P_1 1-p$ 1 < 0,1,0 - 0,1,0 - 1,1,0> M3 $P_1 1-p$ 1 < 0,1,0 - 0,0,1 - 2,1,0> M8
$P_2$ 1 < 2,1,0 - 0,0,1 - 0,1,0> M1 $P_3 1-q$ 1 < 2,1,0 - 0,0,1 - 0,1,0> M1
$P_3 1-q$ 1 < 2,1,0 - 0,1,0 - 0,0,1> M6 $P_3 q$ 1 < 1,1,0 - 0,1,0 - 0,1,0> M9
$P_3 q$ 1 < 1,1,0 - 1,1,0 - 0,0,1> M7