

# Агентне моделювання виникнення та еволюції мови

виконав студент 2 р. н.  
Національного університету “Києво-Могилянська академія”  
факультету інформатики  
спеціальності 122 Комп’ютерні науки  
Сітьков Ілля Павлович

науковий керівник Гулаєва Наталія Михайлівна,  
доцент, кандидат фізико-математичних наук

# Актуальність і мета

## Актуальність дослідження

- причини та умови виникнення й поширення мови є не до кінця з'ясованими, попри існування різноманіття теорій
- агентне моделювання є перспективним з огляду на доступність, швидкість, гнучкість
- відсутній аналіз моделі Еволюційної гри в іменування Ліповської [1] щодо стійкості та впливу зміни параметрів
- модель Ліповської [1] є спрощеною

**Мета:** аналіз впливу параметрів моделі Еволюційної гри в іменування на поведінку моделі Ліповської та її модифікацій.

# Завдання і новизна

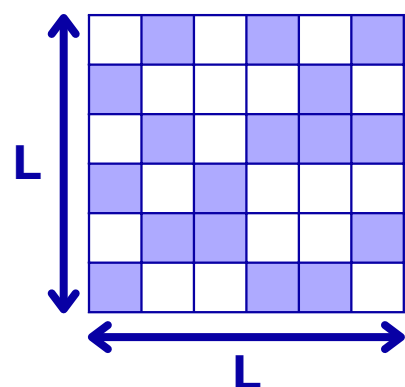
## Завдання

1. Ознайомитись із наявними підходами до вивчення походження та еволюції мови.
2. Імплементувати алгоритм Еволюційної гри в іменування Ліповської [1] та його модифікації, представлені у роботі Молоні [2].
3. Відтворити результати експериментів авторів для перевірки правильності реалізації.
4. Дослідити вплив параметрів моделі на її поведінку та зробити висновок про її стійкість до зміни значень параметрів.
5. Проаналізувати запропоновані Молоні модифікації функції пристосованості, стратегії оцінки ваги слів.
6. Розробити та проаналізувати власні модифікації функції пристосованості, стратегій мутації, вікових змін.
7. Дослідити гіпотезу кореляції між мовами та навчальними здібностями агентів, висунуту Молоні [2].

**Новизна:** встановлено вплив параметрів на поведінку моделі, розроблено та проаналізовано власні модифікації алгоритму.

# Модель Ліповської

## Сітка агентів

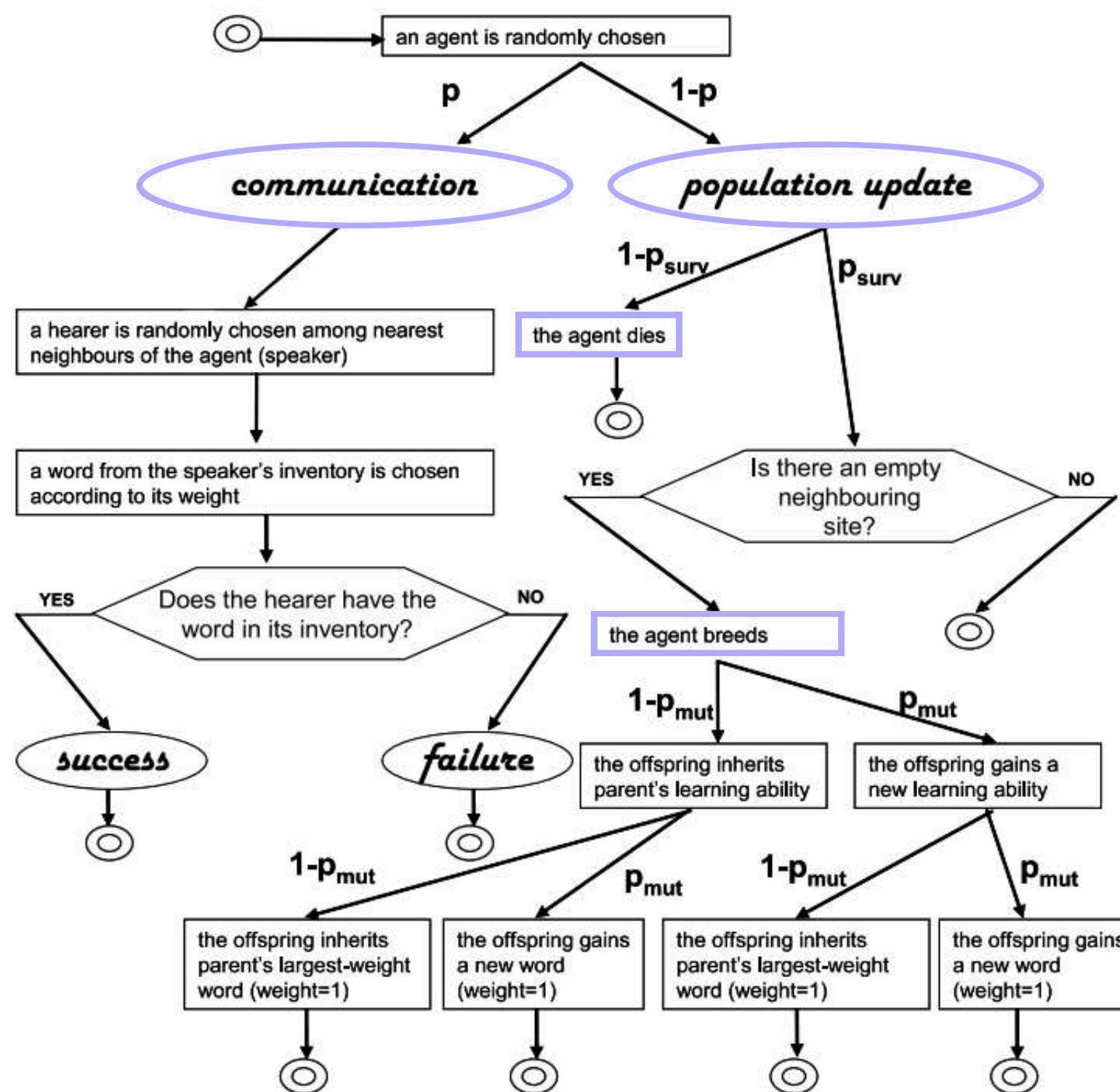


- $T$  ітерацій
- $L \times L$  оп./іт.

## Агент

- навчальна здібність,  $I$  - генотип
- словник розміру  $N$
- вік,  $a$
- рівень знань - сума ваг слів

- $p_{comm}$  - ймовірність комунікації
- $p_{surv}$  - ймовірність виживання
- $p_{mut}$  - ймовірність мутації
- $A$  - коефіцієнт впливу віку агента на виживання
- $B$  - коефіцієнт впливу рівня знань на виживання



Блок-схема Ліповської [1]

# Модель Ліповської

Продовження

Середній рівень знань агентів у популяції

$$W = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N (w_j \in \lambda_k)}{K}$$

де  $K$  – кількість агентів у світі

$N$  – максимальний розмір словника агента

$w_j$  – вага  $j$ -того слова зі словника агента

$\lambda_k$  – словник  $k$ -того агента

Ймовірність виживання

$$p_{surv} = \exp(-Aa) \times \left( 1 - \exp\left(-B \sum_{j=1}^N \frac{w_j}{W}\right) \right)$$

де  $A$  – коефіцієнт впливу віку агента на виживання

$a$  – вік агента

$B$  – коефіцієнт впливу рівня знань на виживання

$w_j$  – вага  $j$ -того слова зі словника агента

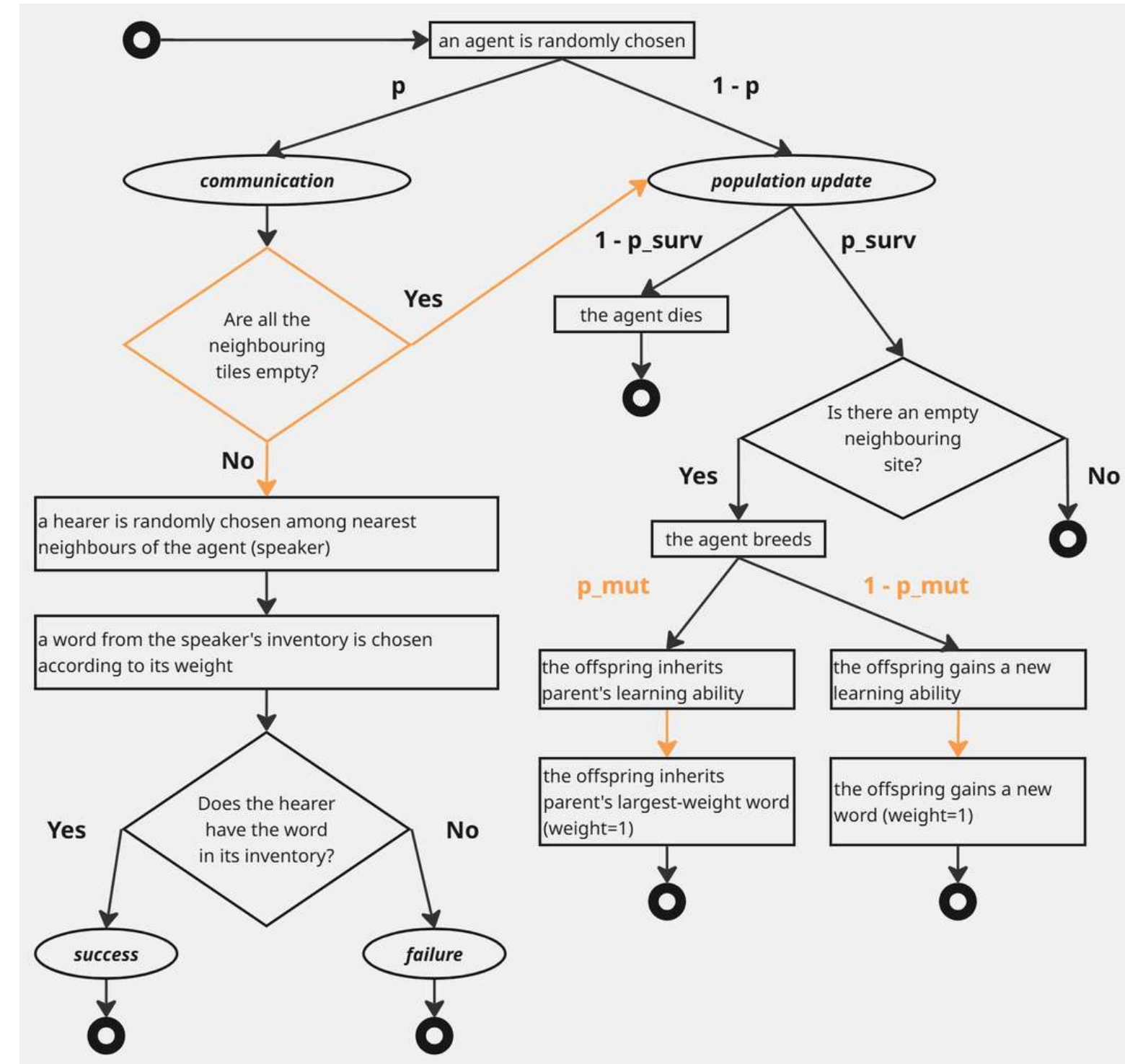
$W$  – середній рівень знань агентів у популяції

# Модель Ліповської

Варіант Молоні

## Відмінності реалізації Молоні

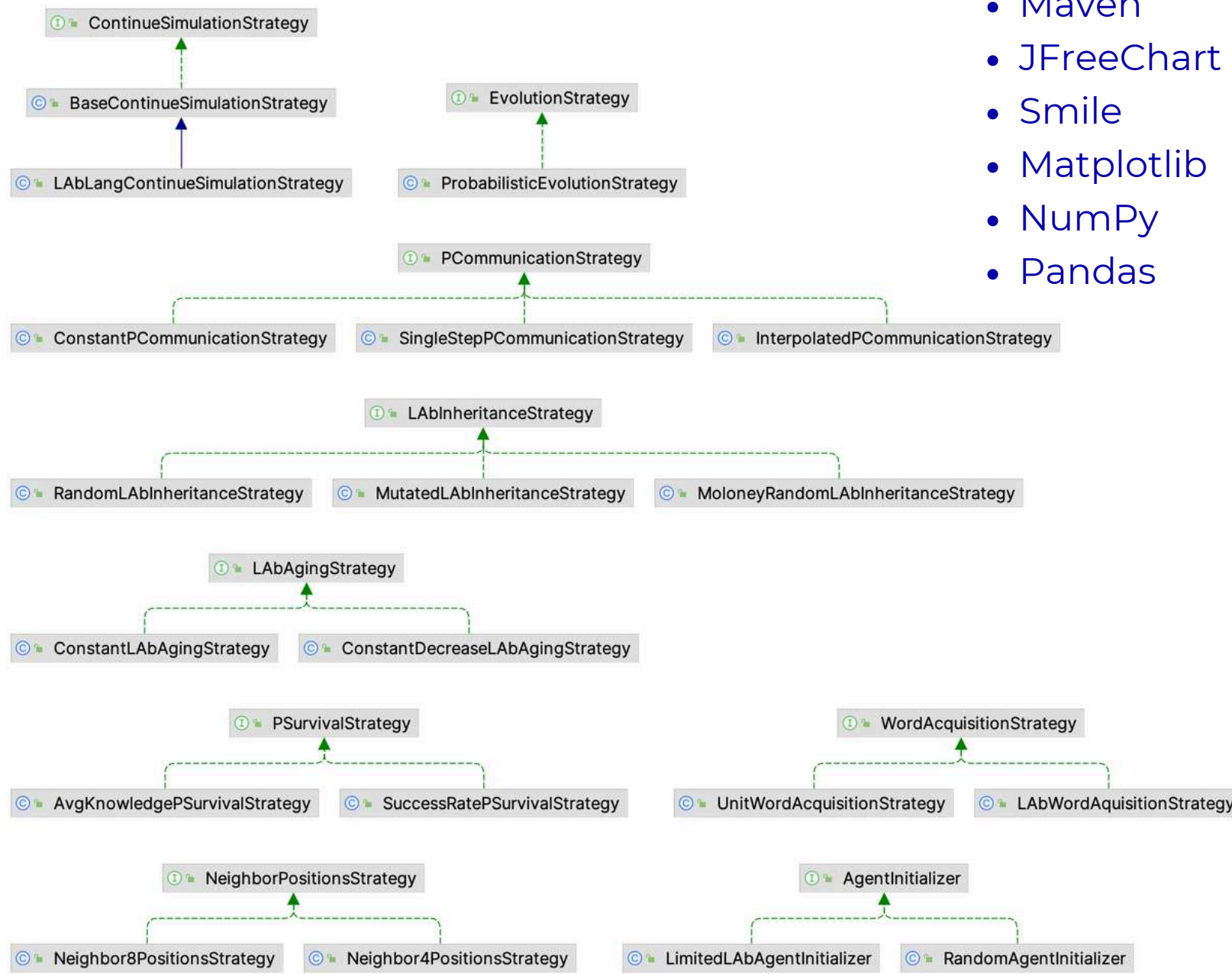
Аспект	Ліповська	Молоні
1. Відсутні сусіди	Перехід до наступного агента	Оновлення популяції
2. Ймовірність мутації	$P(\text{Мутація}) = p_{\text{mut}}$	$P(\text{Мутація}) = 1 - p_{\text{mut}}$
3. Залежність мутації мови від мутації навч. зд.	Ні	Так



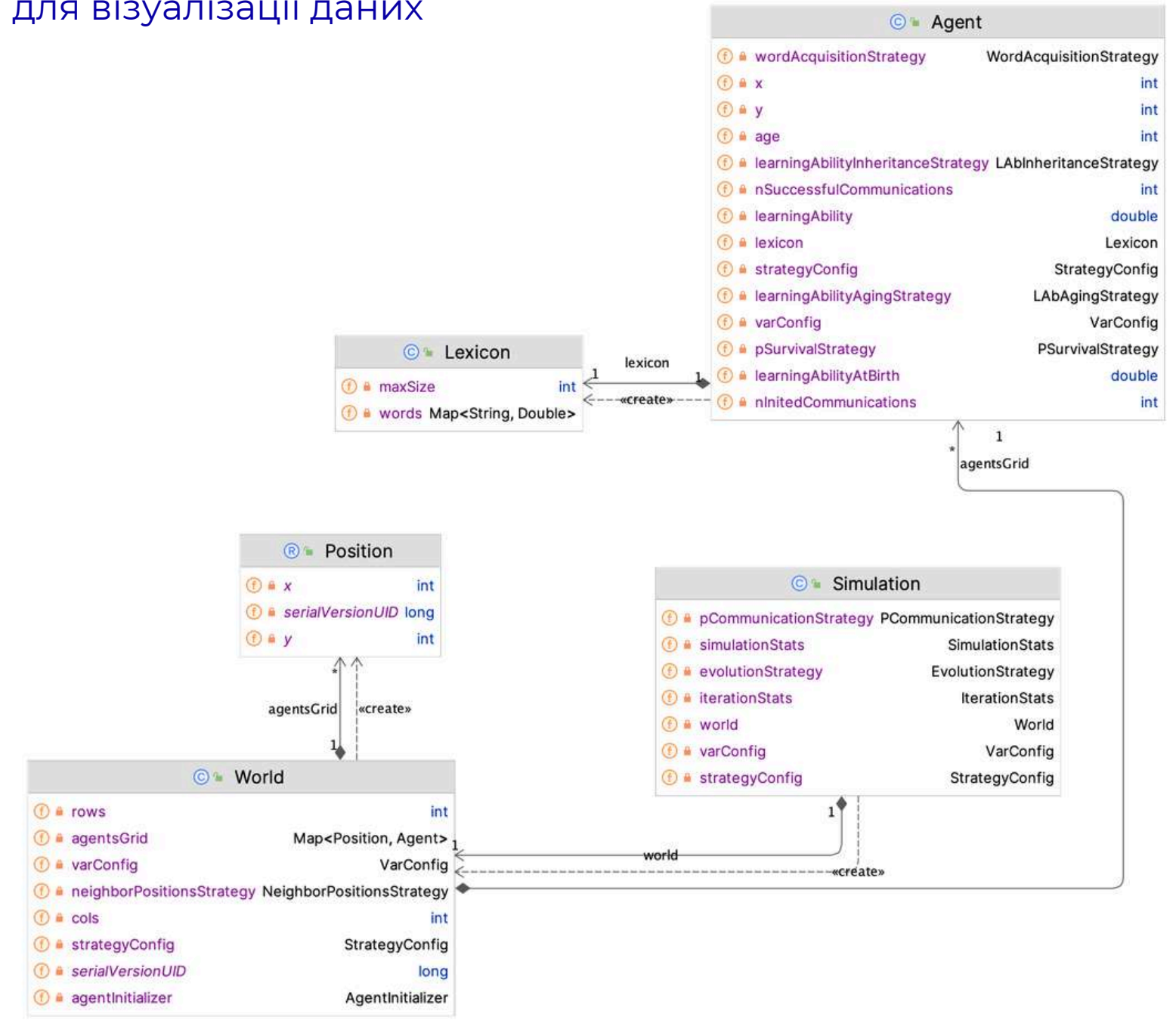
Відтворена блок-схема Молоні [2]

# Імплементація

- **Java** - основна мова розробки
- **Python** - скрипти для візуалізації даних
- Maven
- JFreeChart
- Smile
- Matplotlib
- NumPy
- Pandas



Діаграма класів стратегій



Діаграма основних класів моделі

# Різке збільшення $\rho_{comm}$

Відтворення експериментів. Модель Ліповської

## Дослідження

- залежності успішності комунікації та середньої навч. зд. від  $\rho_{comm}$ .
- ефекту Болдвіна
- біолінгвістичного переходу (БП)

## Зміна $\rho_{comm}$

$\rho_{comm} = 0.1$ , до  $t = 8000$

$\rho_{comm} = 0.98$ , після  $t = 8000$

## Параметри

$L = 40$

$N = 1$

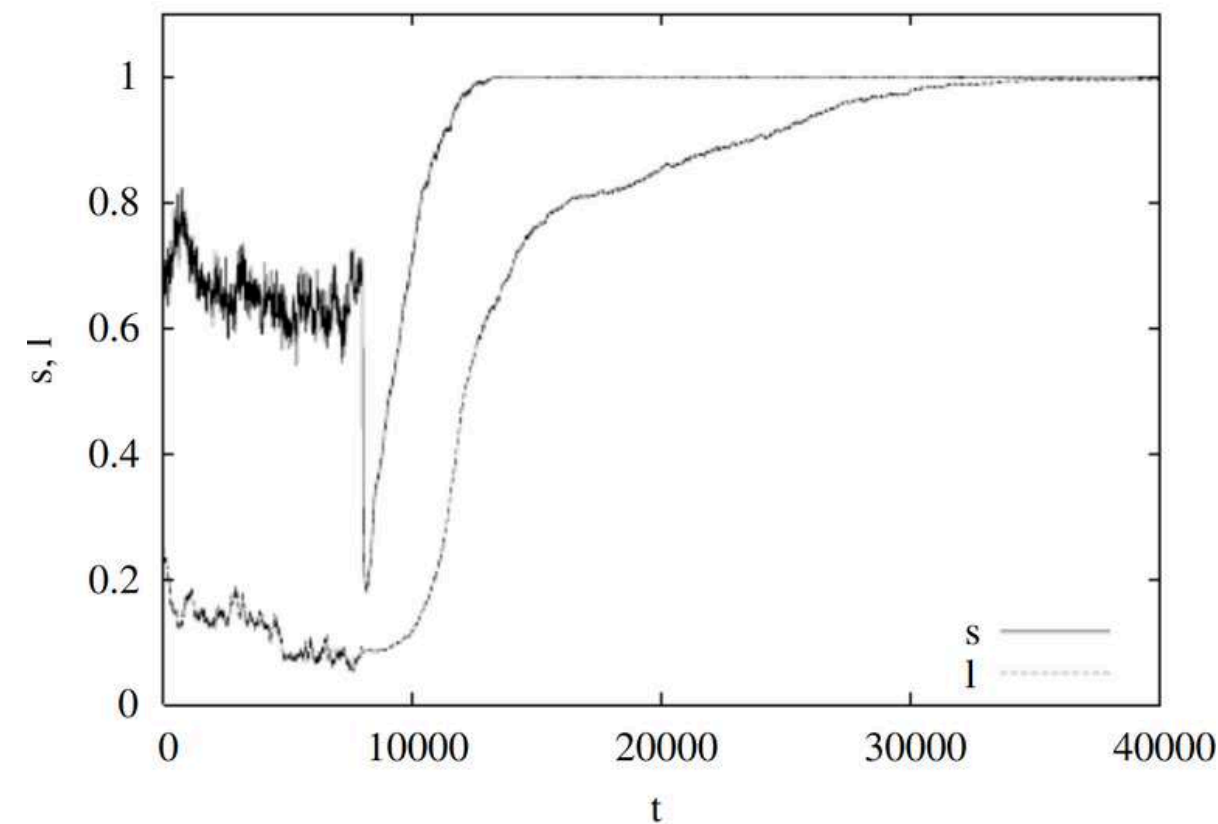
$\rho_{mut} = 0.001$

$A = 0.05$

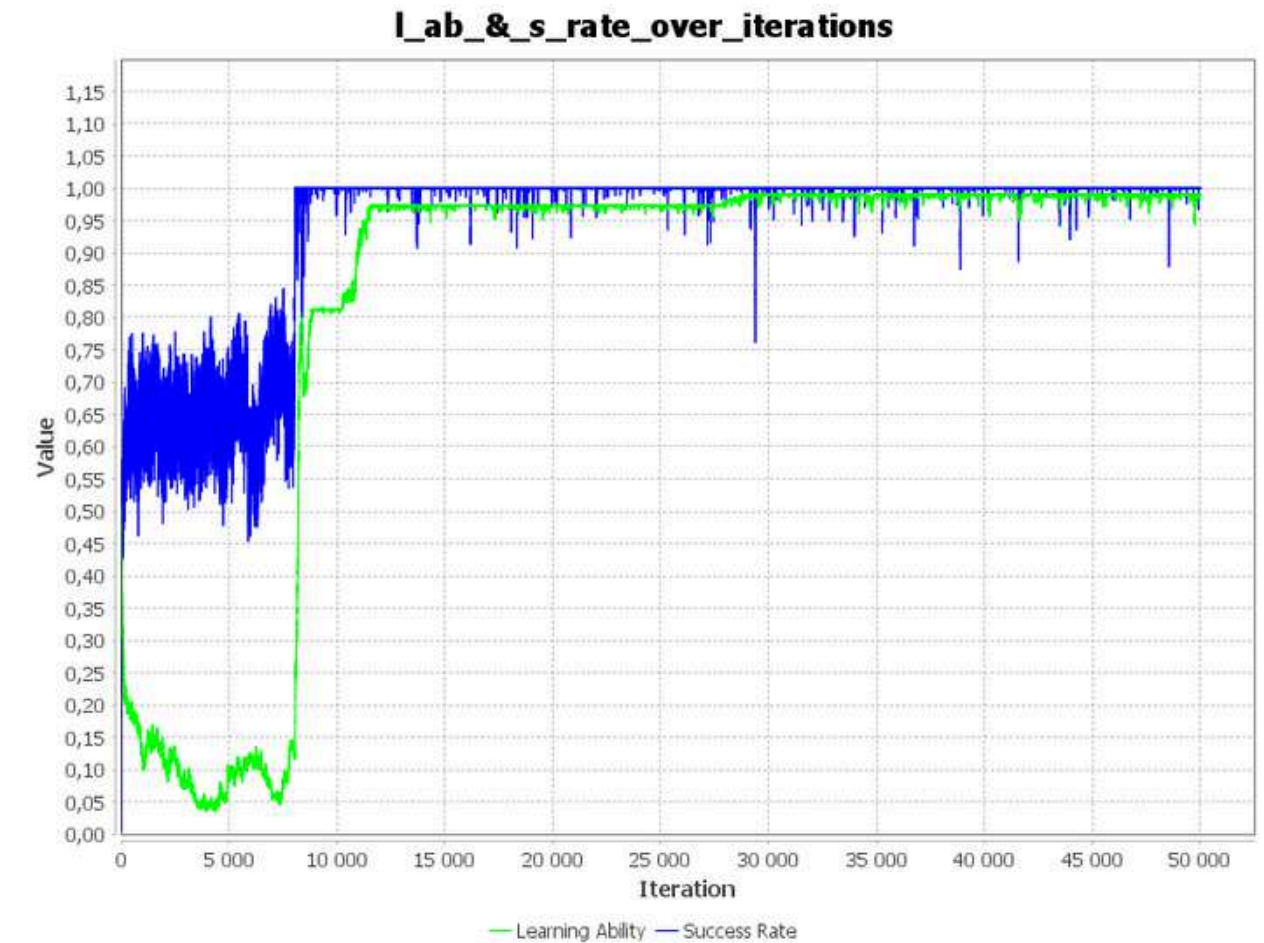
$B = 5$

$T = 50000$

**Ініціалізація:** випадкове слово з  $w = 1$ ,  $l \in (0, 1)$



Результат Ліповської [3]



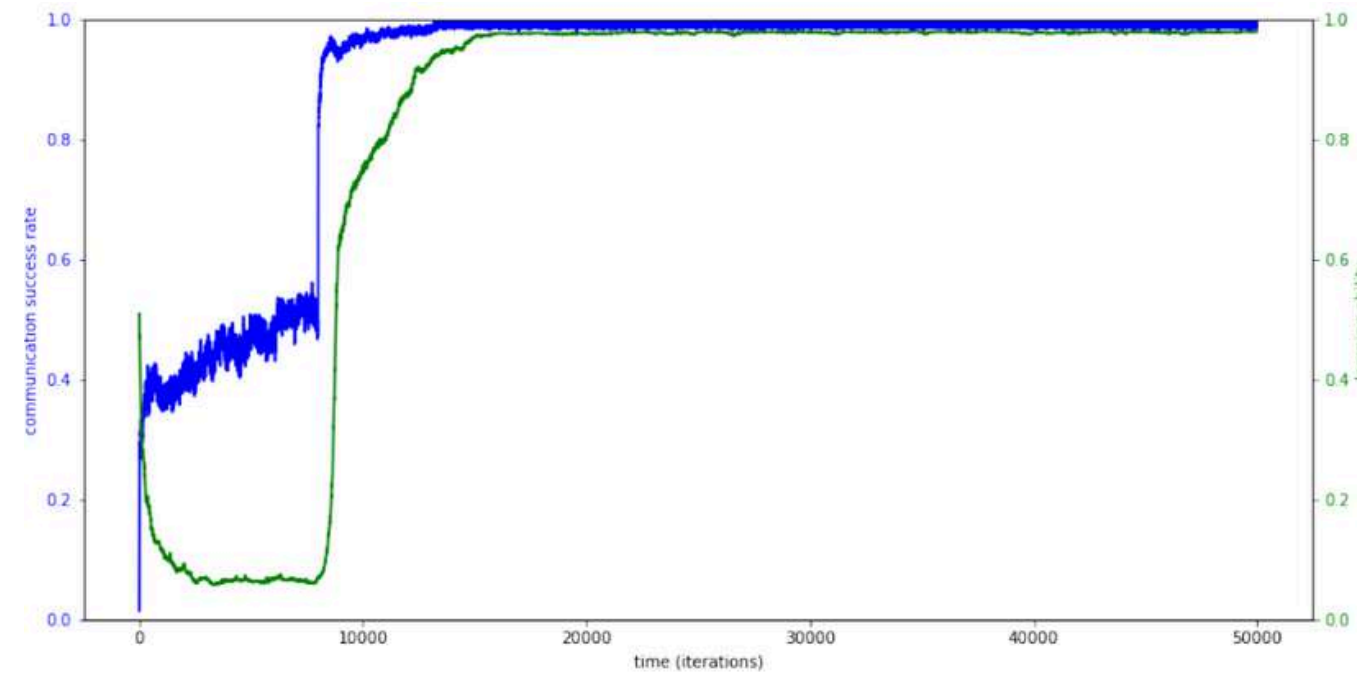
Відтворений результат

# Різке збільшення $p_{comm}$

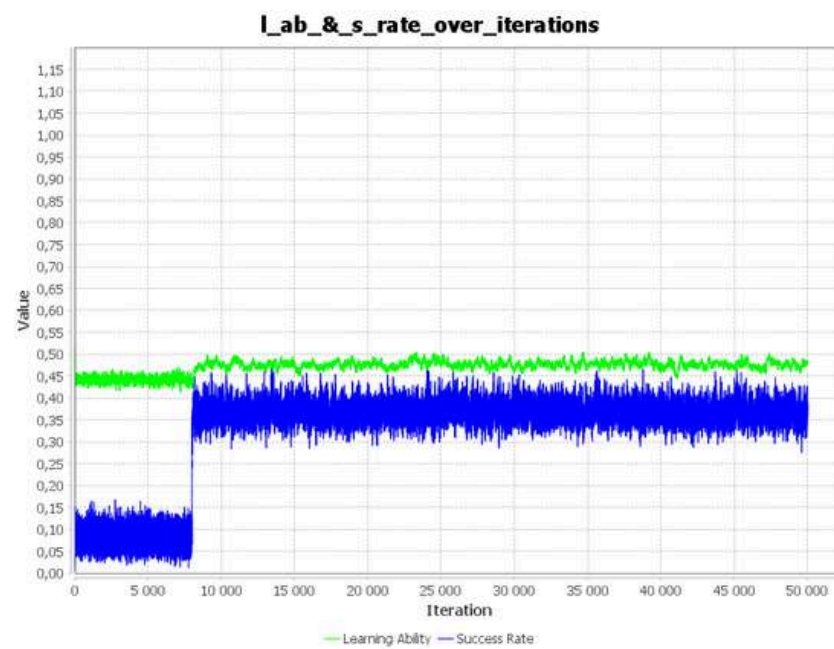
Відтворення експериментів. Модель Молоні

Виправлено лістинг та умови експерименту

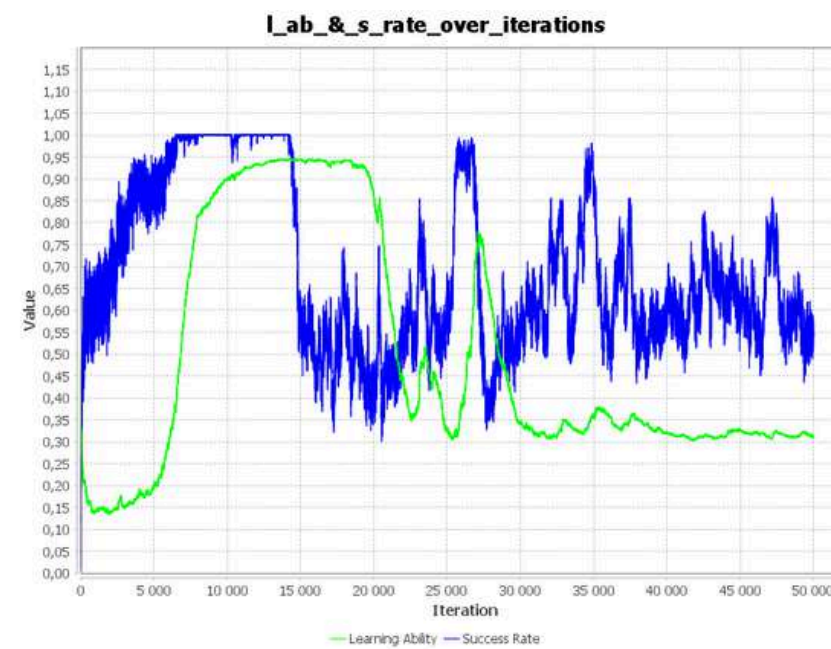
- $P(\text{Мутація}) = 1 - p_{mut}$
- $P(\text{Мутація}) = p_{mut}$
- ~~$A = 0.005$~~
- $A = 0.05$



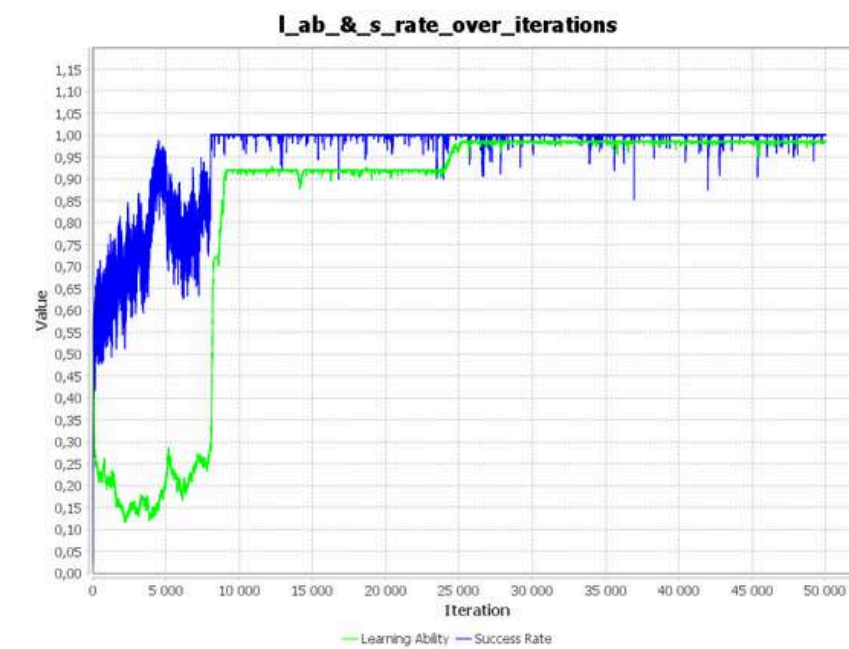
Результат Молоні [2]



Помилка в лістингу



Неточне значення A



Результат виправленої моделі

# Лінійне збільшення $p_{comm}$

Відтворення експериментів. Модель Ліповської

## Дослідження

- залежності успішності комунікації та середньої навч. зд. від  $p_{comm}$
- $p_{comm}$  біолінгв. переходу

## Зміна $p_{comm}$

$$p_{start} = 0.1$$

$$p_{end} = 0.5$$

$$p_{comm}(t) = p_{start} + \frac{(p_{end} - p_{start}) \times t}{T - 1}$$

## Параметри

$$L = 60$$

$$N = 1$$

$$p_{mut} = 0.001$$

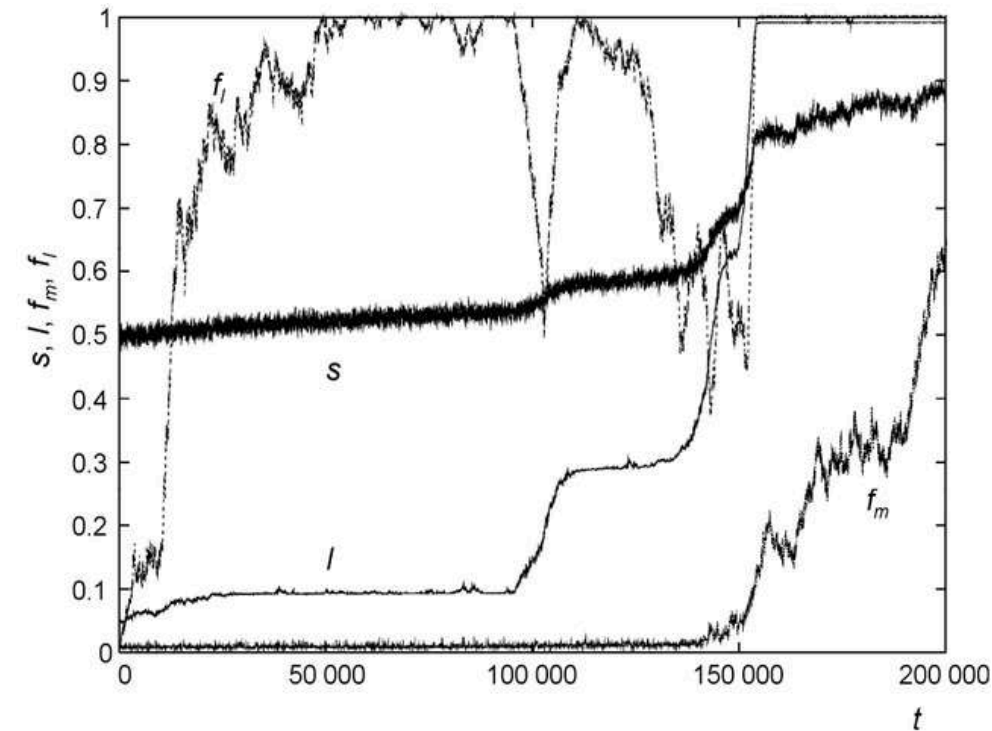
$$A = 0.05$$

$$B = 5$$

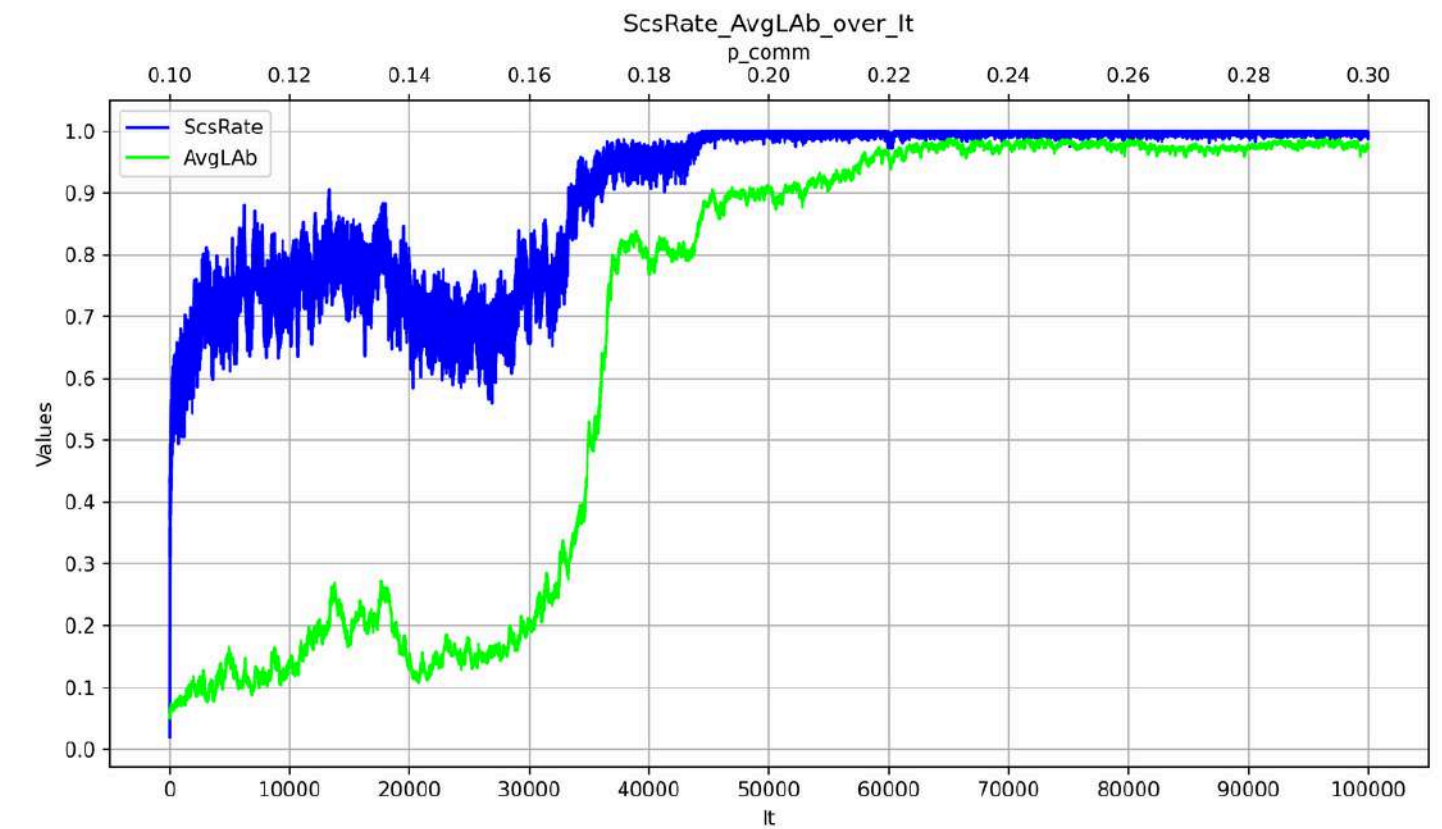
$$T = 200000$$

$$T_{real} = 100000$$

**Ініціалізація:** випадкове слово з  $w = 1, l \in (0, 0.1)$



Результат Ліповської [1]



Відтворений результат

# Зміна $p_{comm}$ з кроком 0.01

Відтворення експериментів. Модель Ліповської

## Дослідження

- залежності успішності комунікації та середньої навч. зд. від  $p_{comm}$
- $p_{comm}$  біолінгв. переходу

## Зміна $p_{comm}$

$$p_{comm\_increasing} \in [0.11, 0.19]$$

$$p_{comm\_decreasing} \in [0.01, 0.15]$$

$$p_{comm\_increasing}(t+T) = p_{comm}(t) + 0.01$$

$$p_{comm\_decreasing}(t+T) = p_{comm}(t) - 0.01$$

## Параметри

$$L = 60$$

$$N = 1$$

$$p_{mut} = 0.001$$

$$A = 0.05$$

$$B = 5$$

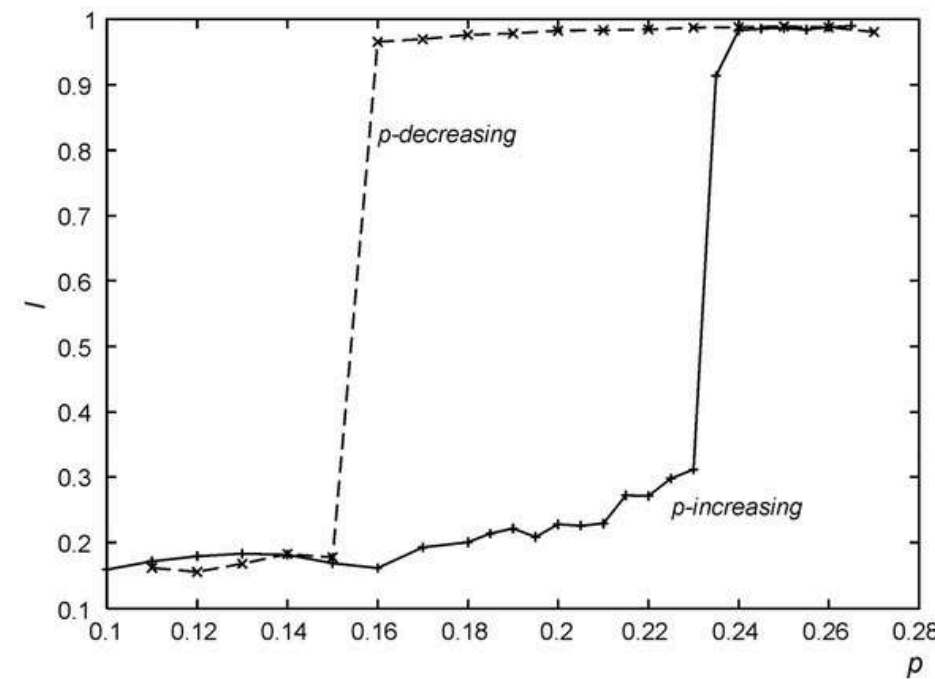
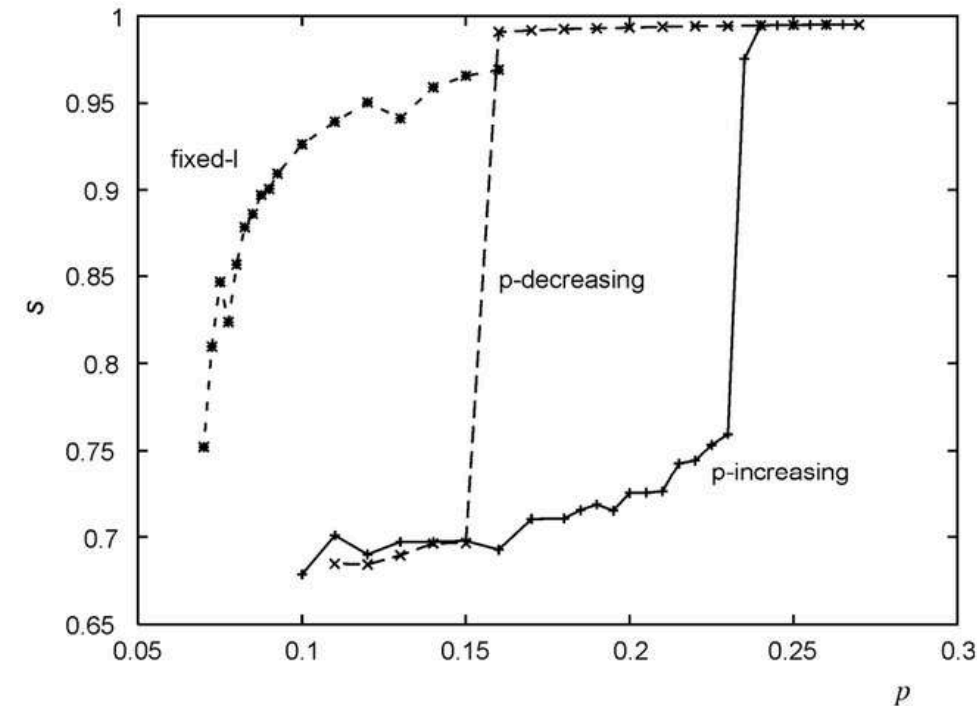
$$T = 7000 \text{ іт./} p_{comm}, T_{discarded} = 3000 \text{ іт./} p_{comm}$$

**Ініціалізація збільшення:** випадкове слово

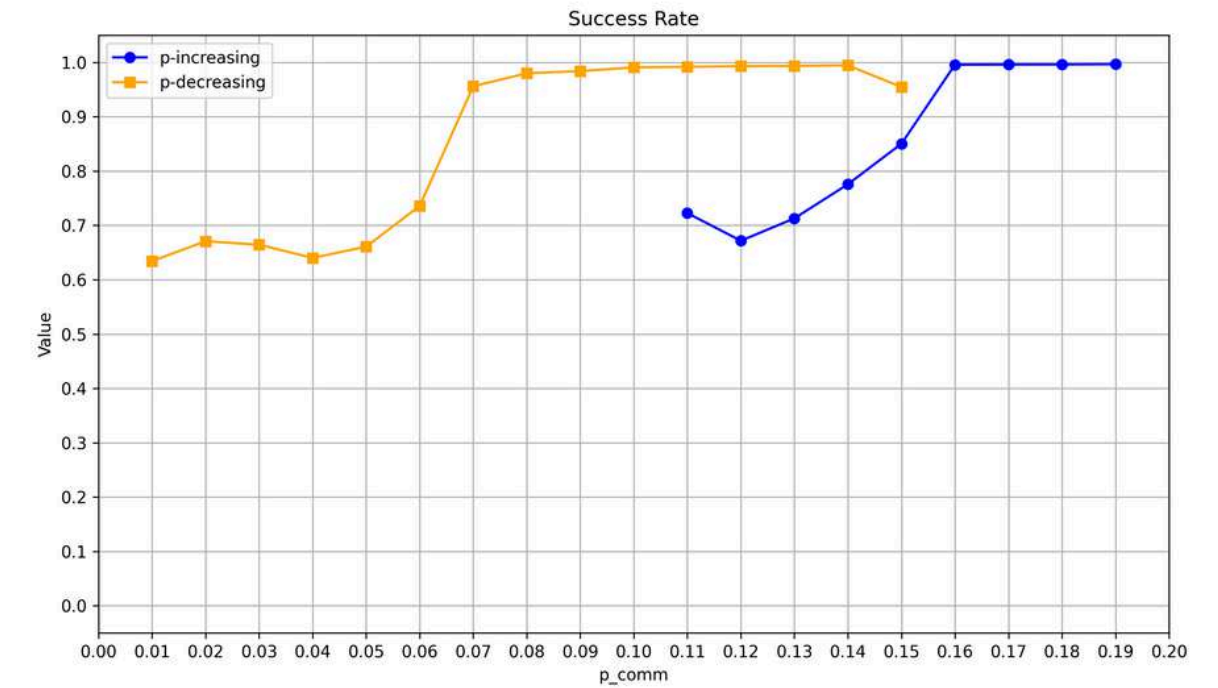
з  $w = 1, l \in [0, 1]$

**Ініціалізація зменшення:** одномовна

популяція з високою здатністю до навчання



Результат Ліповської [1]



Відтворений результат

# Аналіз відтворюваності

## Недоліки робіт

- помилка Молоні
- відсутність/невідповідність умов експериментів та результатів

## Висновок

- Відтворюваність є частковою

## Результати відтворених експериментів

Експеримент	Критерій	Модель Ліповської	Відтворена модель Ліповської	Модель Молоні	Відтворена модель Молоні
Річке збільшення $p_{comm}$	форма графіків зміни $s, l$	сигмоїда	сигмоїда	сигмоїда	сигмоїда
Лінійне збільшення $p_{comm}$	$p_{comm}$ БП	$\approx 0.4$	0.16875 $\pm 0.01031$ (4 запуски)	$\approx 0.15$	$\approx 0.12$
Збільшення $p_{comm}$ з кроком 0.01	$p_{comm}$ БП	$\approx 0.23$	$\approx 0.16$	$\approx 0.12$	$\approx 0.11$
Зменшення $p_{comm}$ з кроком 0.01	$p_{comm}$ зворотного БП	$\approx 0.15$	$\approx 0.06$	–	$\approx 0.01-0.02$

# Стійкість моделі Ліповської

Ліповська та Молоні не наводять доказів стійкості або чутливості моделі до зміни значень параметрів.

## Дослідження

залежності успішності комунікації та здатності до навчання від  $p_{comm}$  при зміні стратегій та значень параметрів.

## Висновки

- поведінка популяцій очікувано змінюється в залежності від параметрів, однак є послідовною між експериментами
- модель є стійкою до зміни значень параметрів (окрім A)
- попри твердження Молоні [2], популяції не вимирають при будь-якій зміні A
- варіант моделі Молоні демонструє однакову динаміку з моделлю Ліповської

## Дослідження на основі результатів експериментів

- Різке збільшення  $p_{comm}$
- Лінійне збільшення  $p_{comm}$  ( $L = 40$ )
- Зміна  $p_{comm}$  з кроком 0.01 ( $L = 40$ ,  $T = 8000$ ,  $T_{discarded} = 3000$ )

## Результати дослідження стійкості

Параметр	Значення	Стійкість
L	20, 30, 40, 60, 70	Так
a	0, 1, 5, 10	Так
A	0, 0.005, 0.05, 0.1, 0.5, 4	Ні
N	1, 5, 10	Так
Стратегія вибору сусідів	8, 4 діаг., 4 верт., гор.	Так

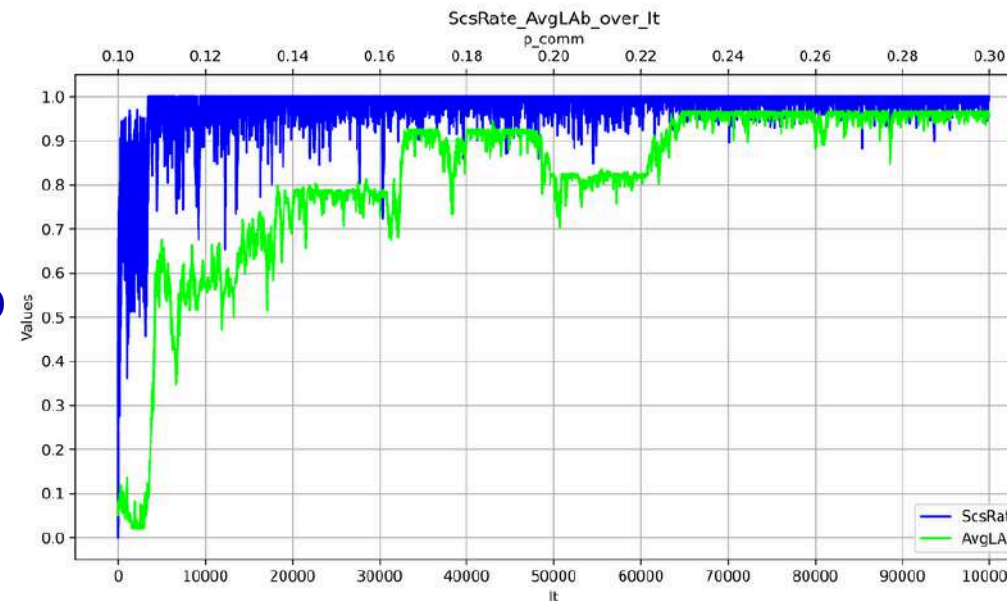
# Вплив параметрів

## Розмір популяції

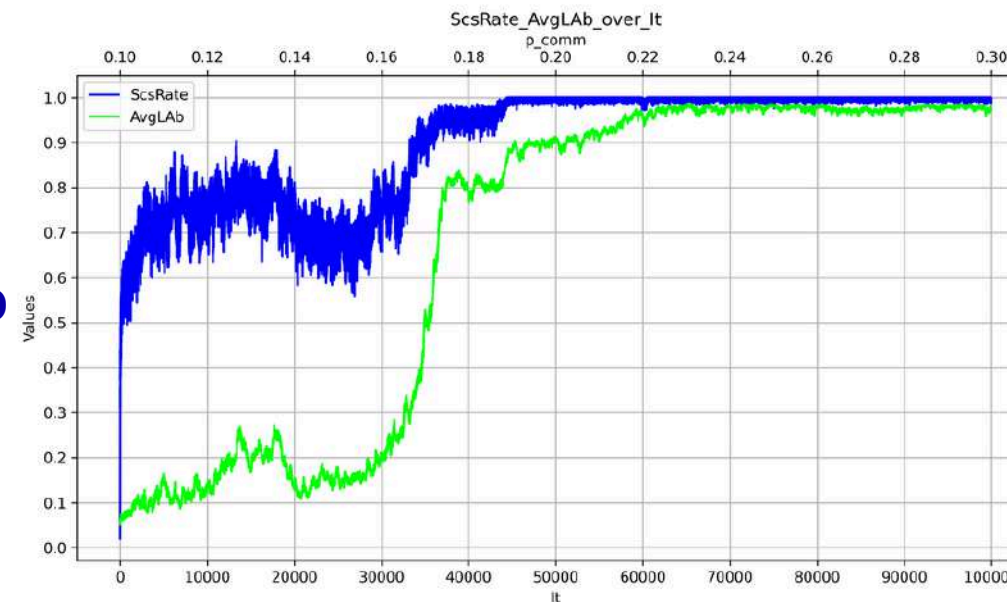
### Збільшення розміру популяції викликає

- зниження стохастичності успішності комунікації та навч. зд.
- збільшення  $p_{comm}$  біолінгвістичного переходу
- зменшення  $p_{comm}$  зворотного переходу

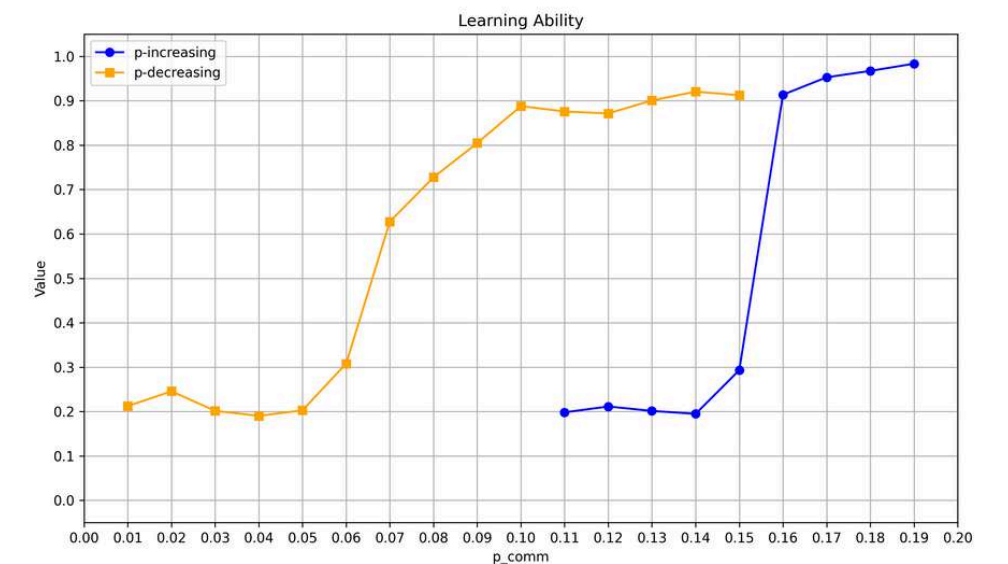
L = 20



L = 60



Лінійне збільшення  $p_{comm}$



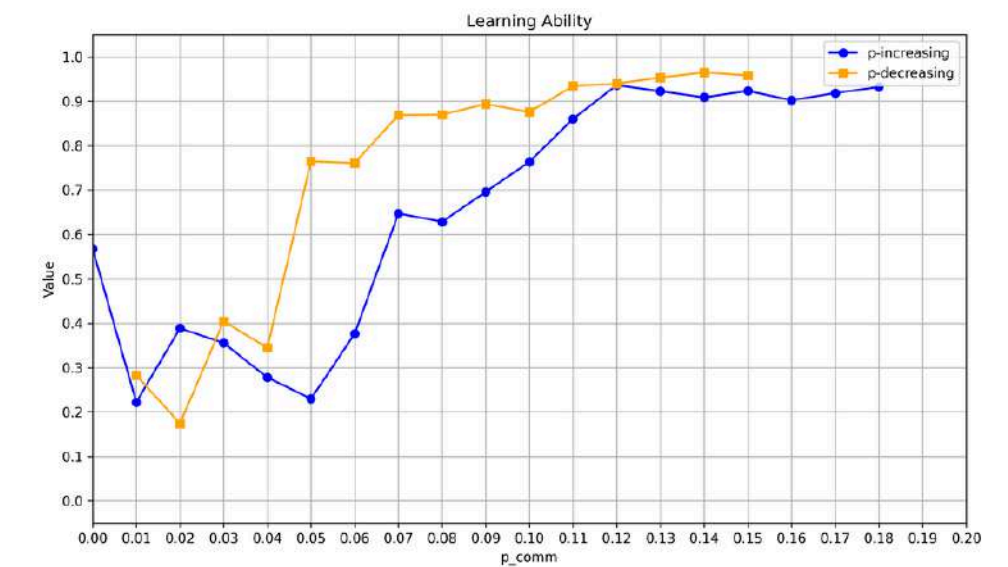
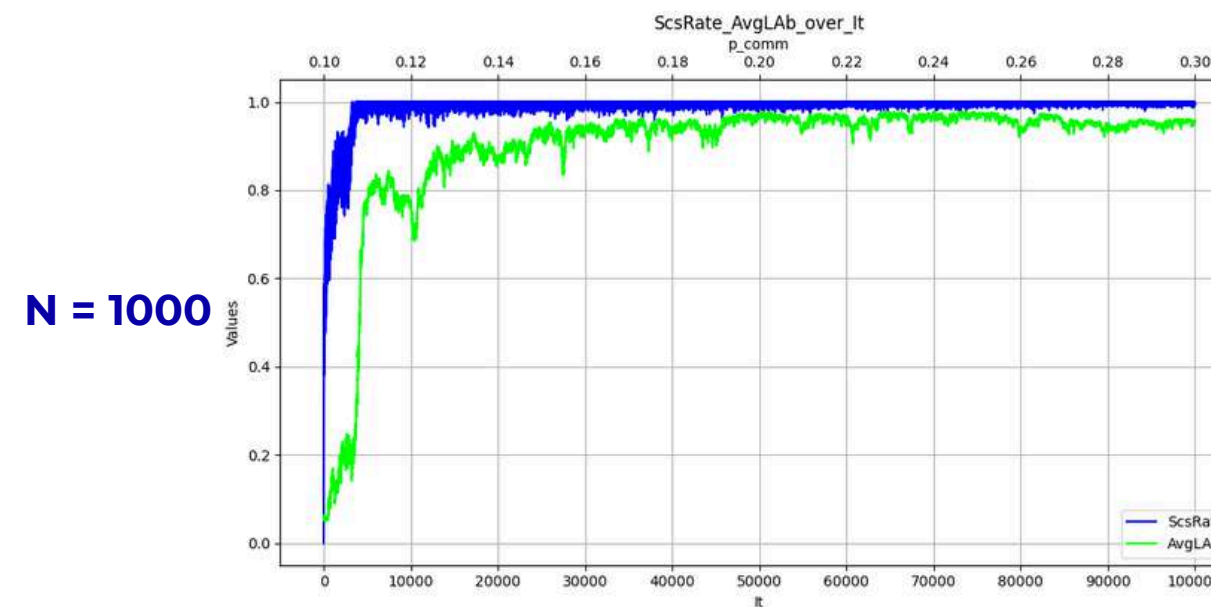
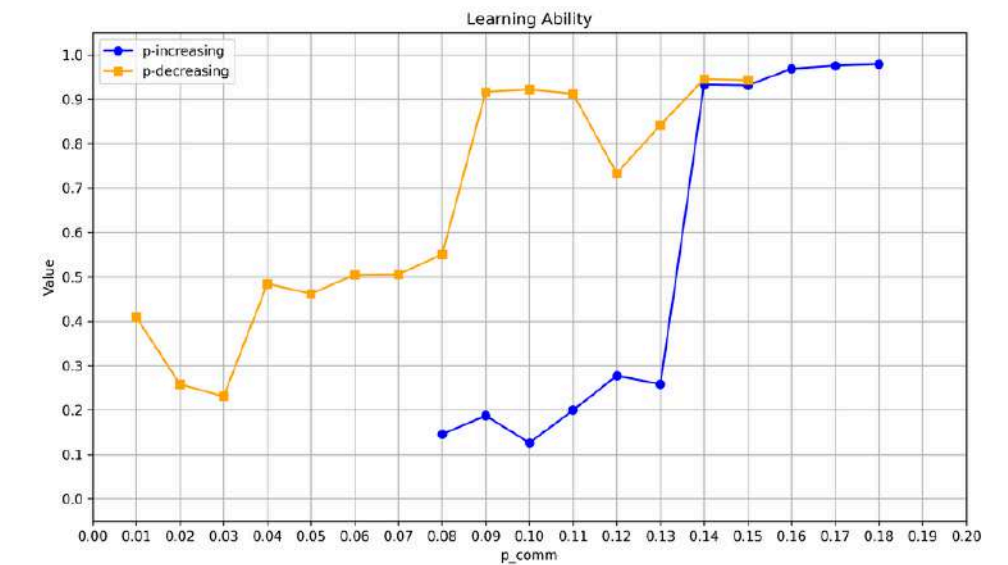
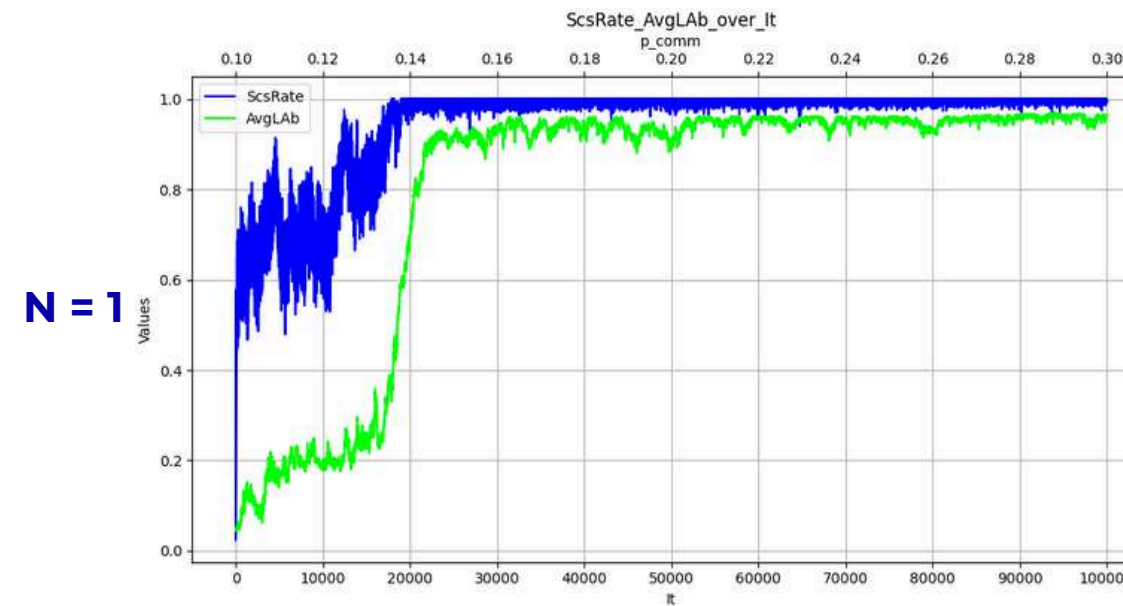
Зміна  $p_{comm}$  з кроком 0.01

# Вплив параметрів

## Розмір словника

### Збільшення розміру словника

- сприяє більш ранньому білінгвістичному переходу та пізньому зворотному переходу



Лінійне збільшення  $p_{comm}$

Зміна  $p_{comm}$  з кроком 0.01

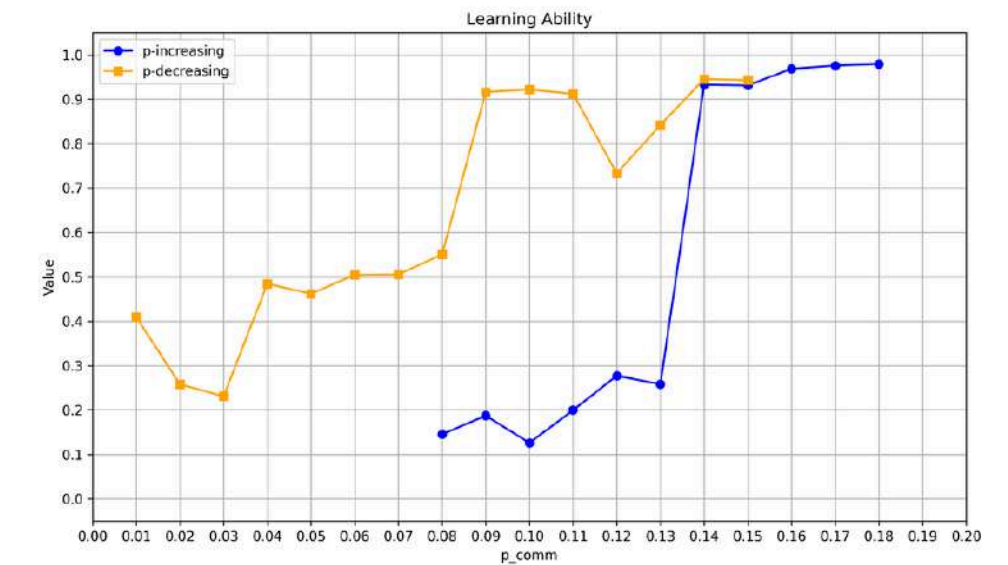
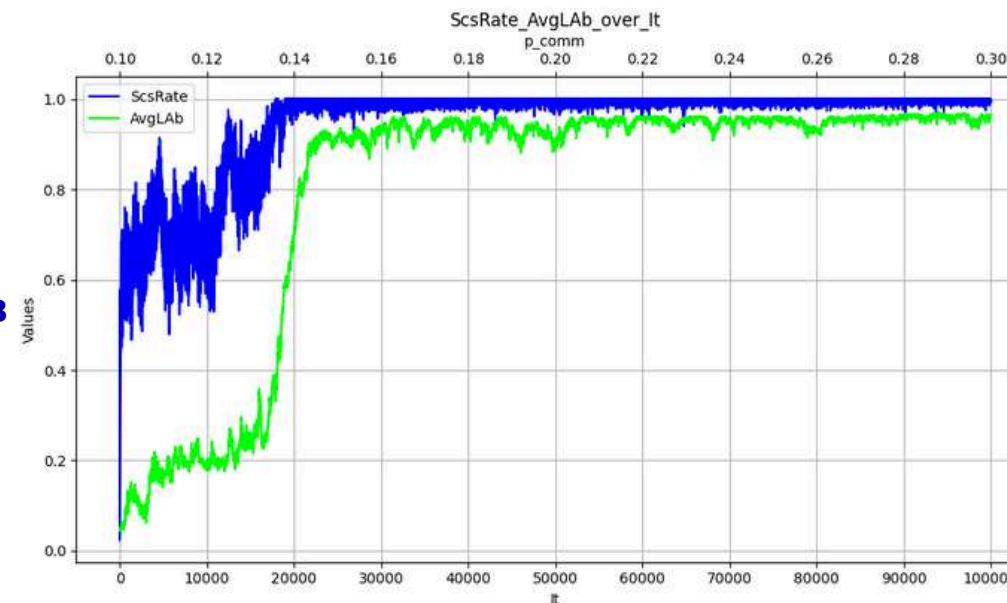
# Вплив параметрів

## Стратегія вибору сусідів

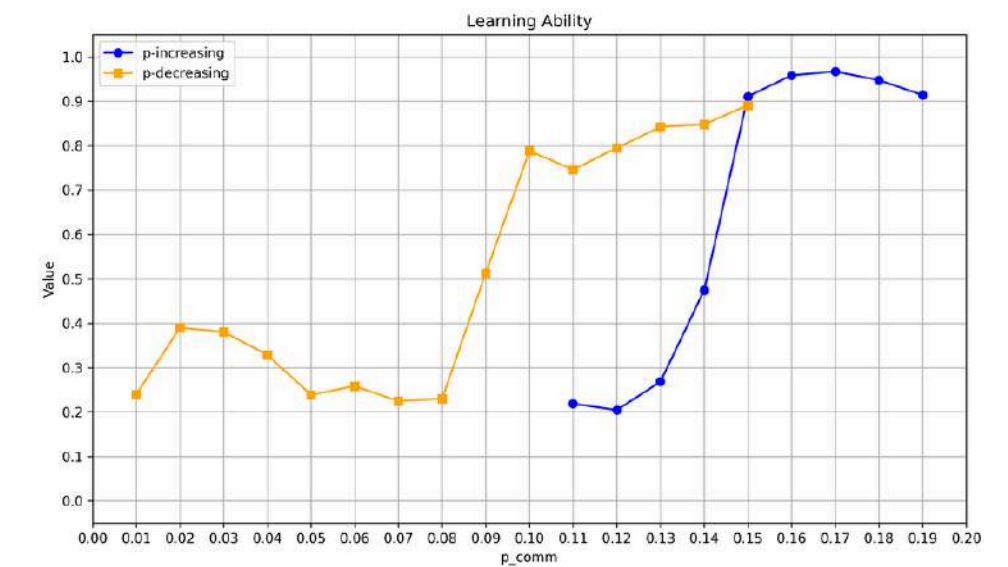
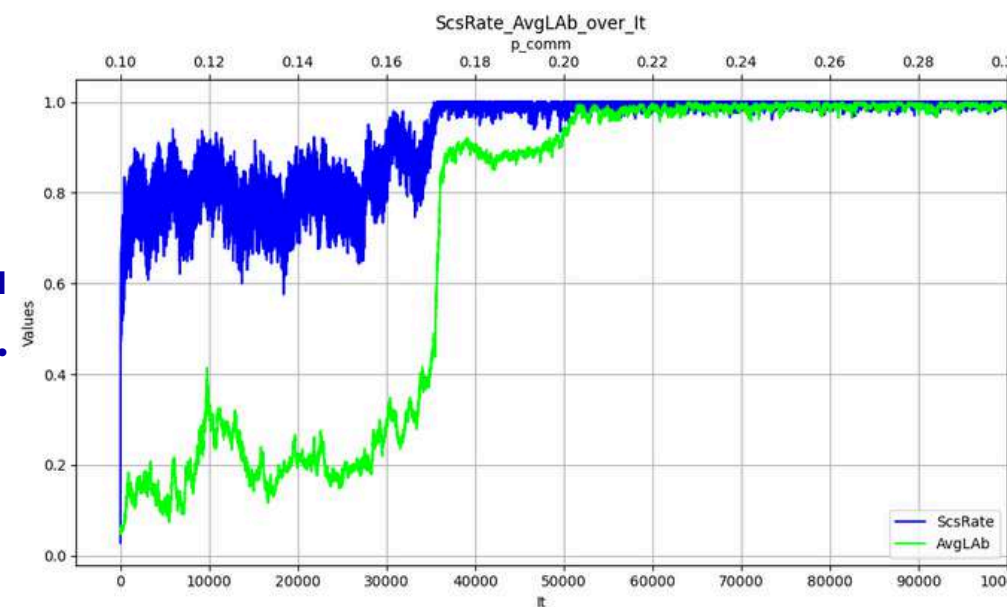
### Зменшення кількості сусідів до 4

- призводить до зростання  $p_{comm}$  біол. переходу та зниження  $p_{comm}$  зворотного переходу

8 сусідів



4 сусіди  
верт., гор.



Лінійне збільшення  $p_{comm}$

Зміна  $p_{comm}$  з кроком 0.01

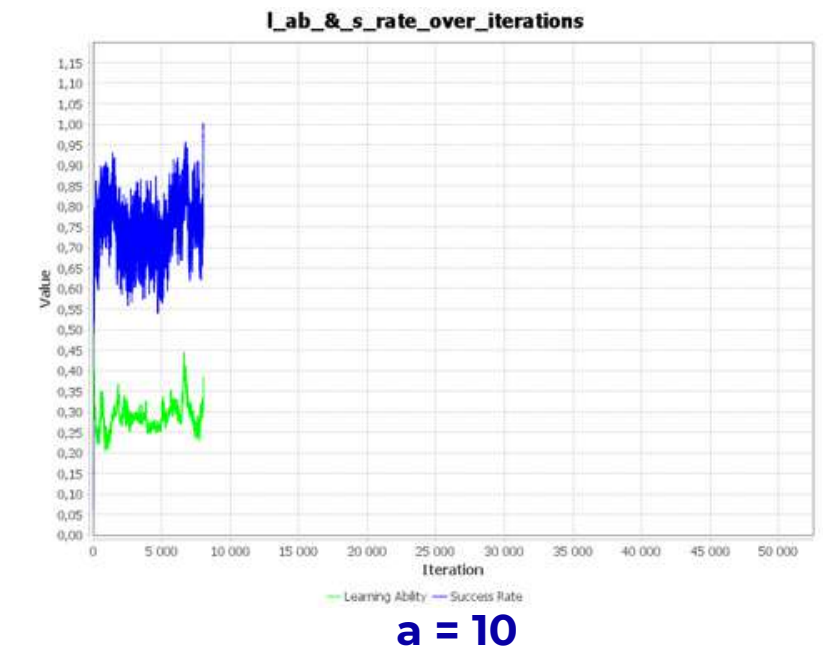
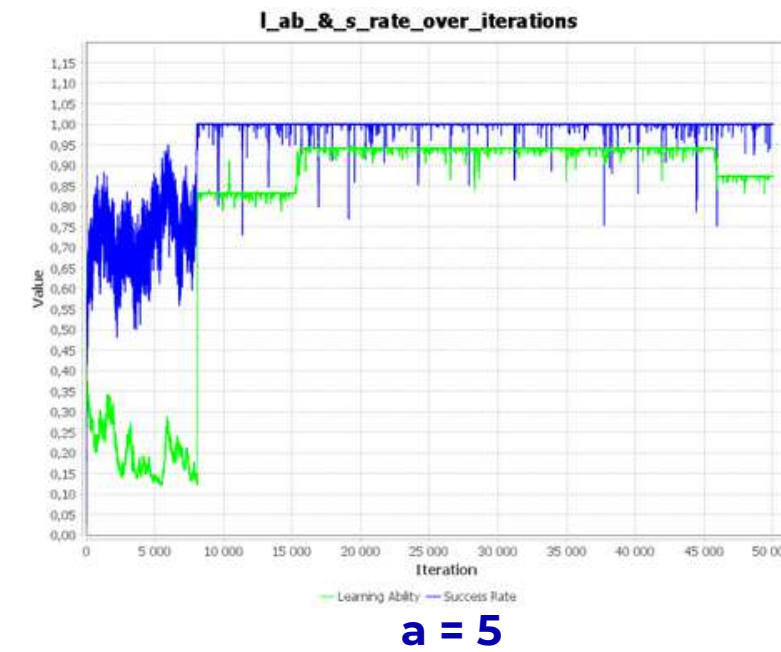
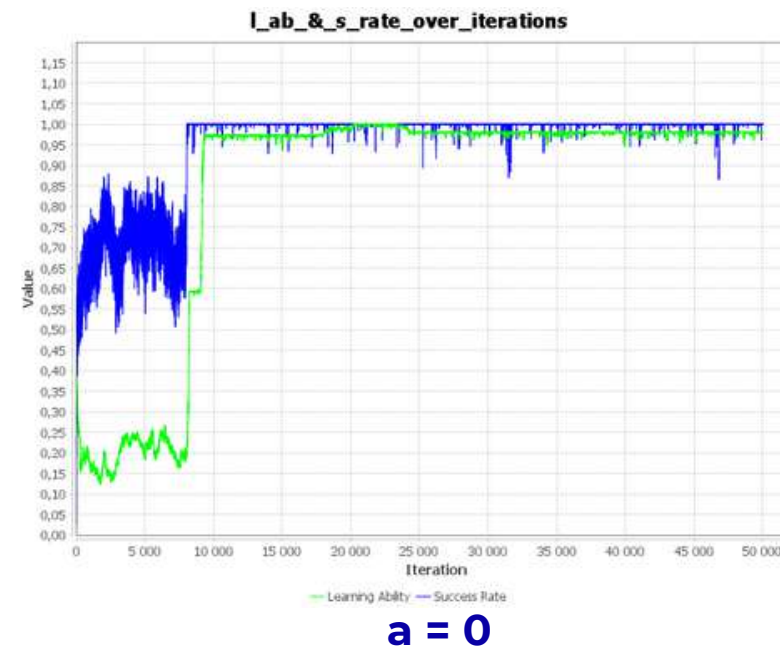
# Вплив параметрів

## Початковий вік агентів

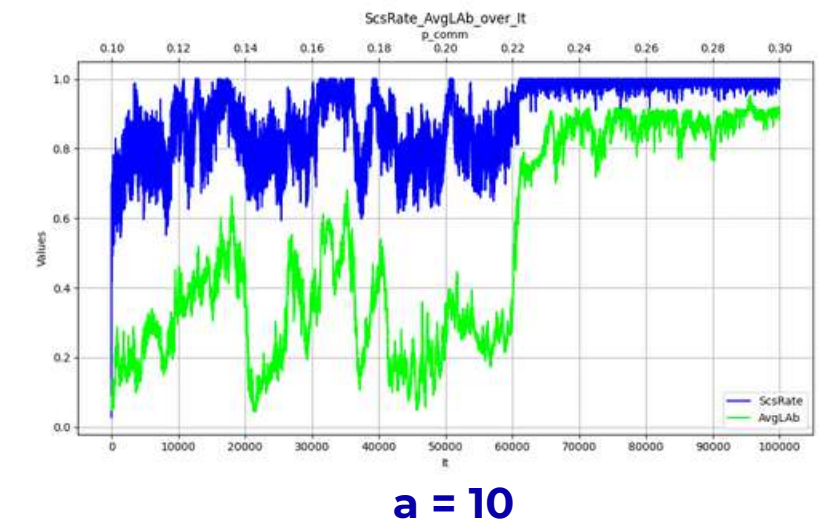
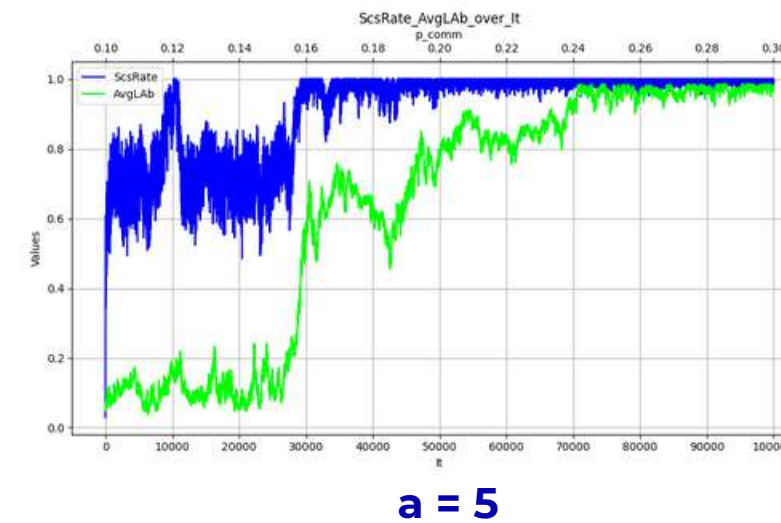
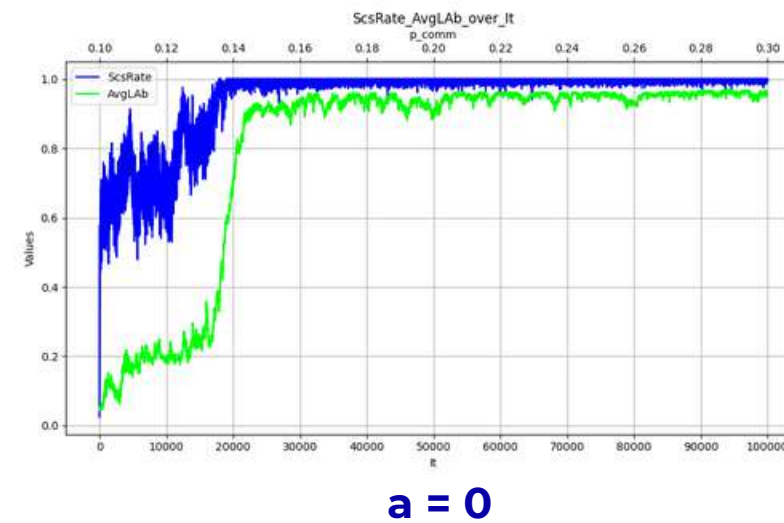
### Збільшення початкового віку

- посилення коливань показників
- вимирання популяції за низької ймовірності оновлення
- пізній біолінгвістичний перехід

### Різке збільшення $p_{comm}$



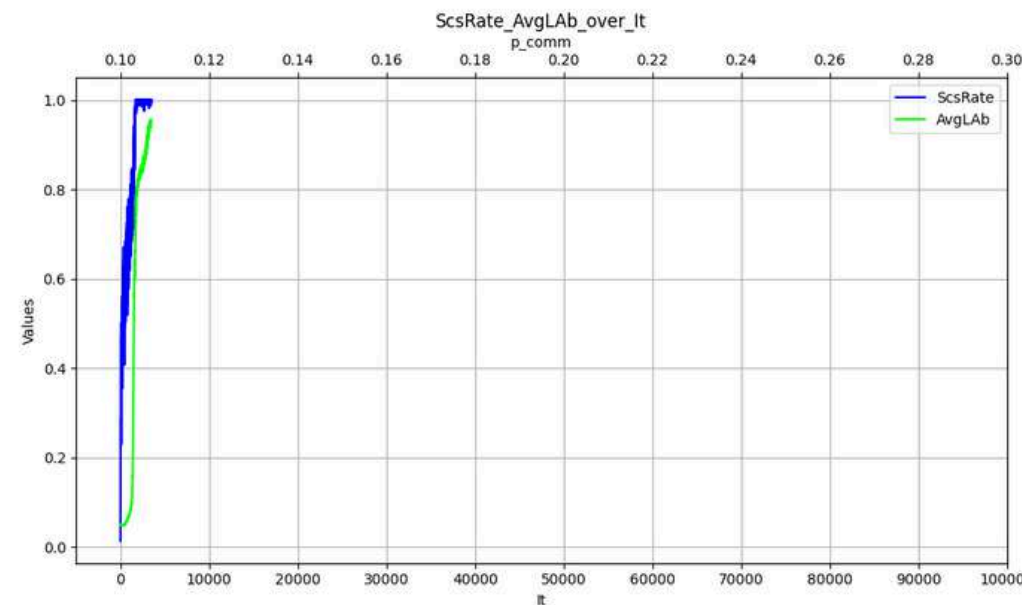
### Лінійне збільшення $p_{comm}$



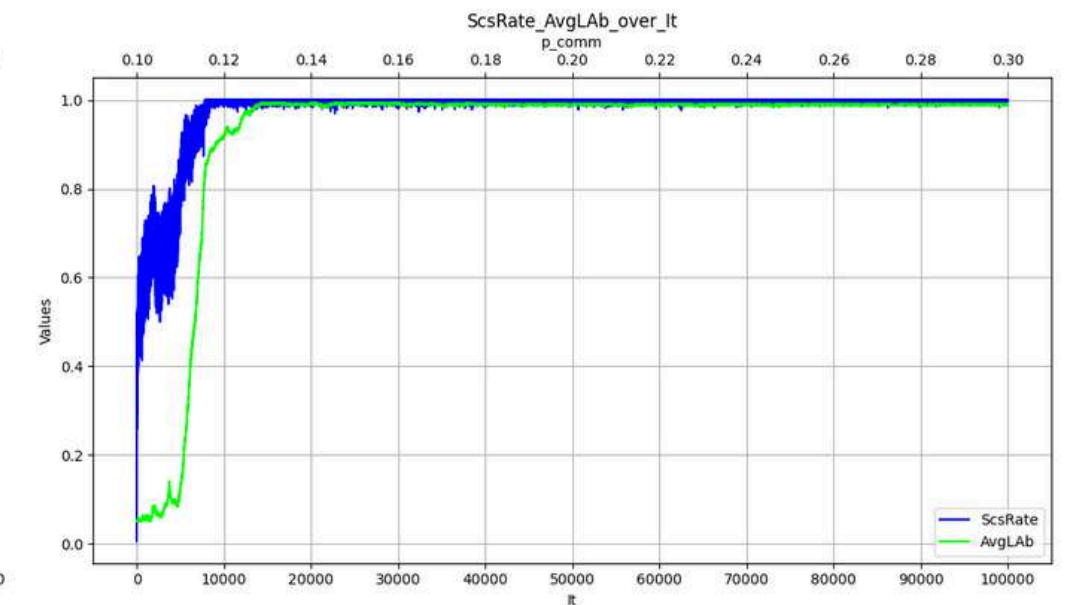
# Вплив параметрів

## Параметр А

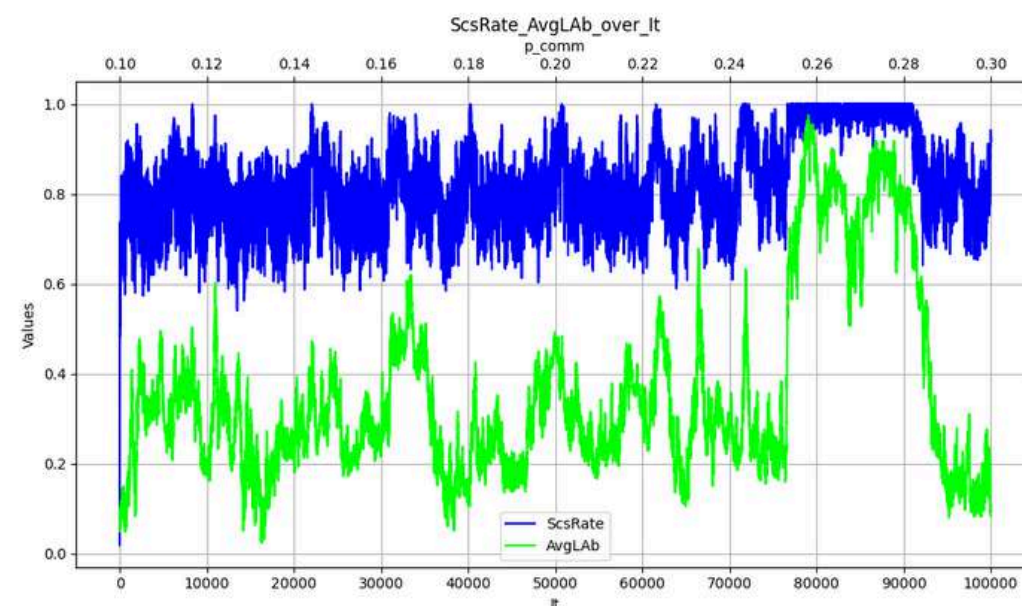
### Лінійне збільшення $p_{comm}$



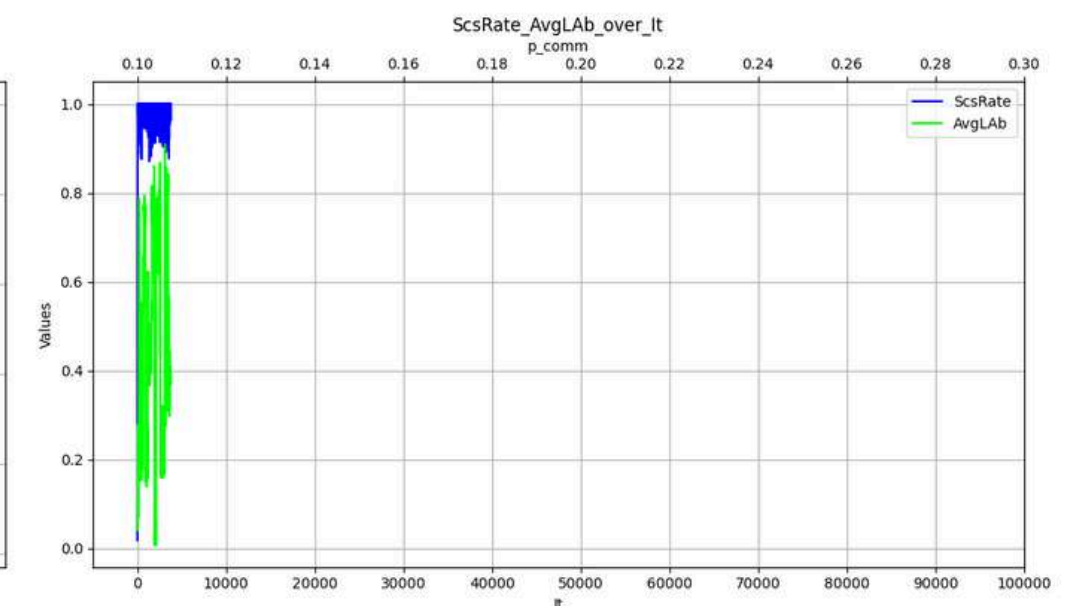
**A = 0**



**A = 0.005**



**A = 0.5**



**A = 4**

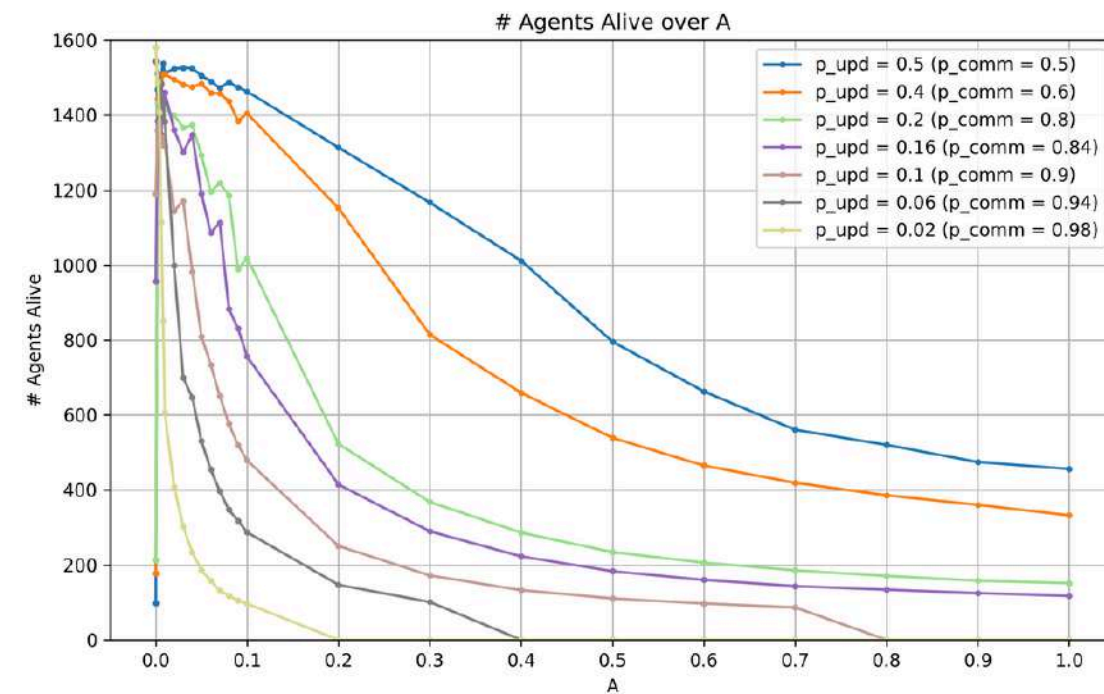
### Вплив значень параметра А

- **A = 0** - вимирання внаслідок необмеженого зростання знань
- **низьке А** - швидкий біол. перехід
- **збільшення А** - зростання  $p_{comm}$  БП, посилення коливань
- **високе А** - відсутність БП, вимирання внаслідок суттєвого впливу віку на виживання

# Особливості параметрів $A$ , $p_{comm}$

## Кількість живих агентів у популяції

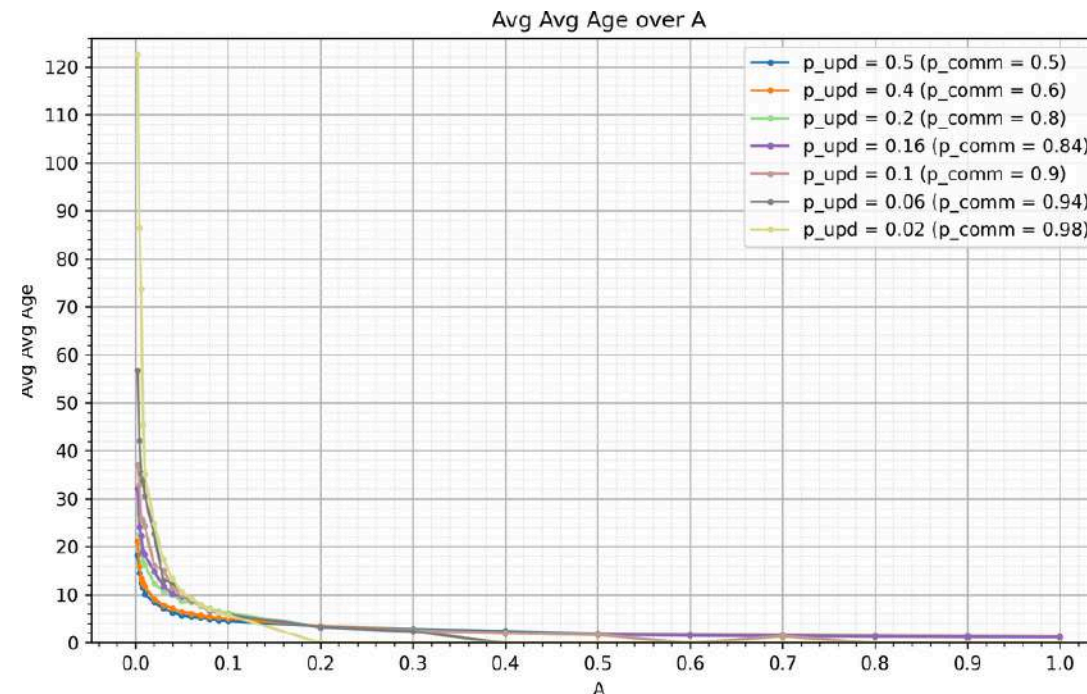
- збільшення значення  $A$  призводить до зменшення чисельності популяції
- більш стрімке зниження чисельності й вимирання зі зменшенням ймовірності оновлення  $p_{upd}$  ( $= 1 - p_{comm}$ )



Кількість агентів в залежності від  $A$

## Середній вік агентів

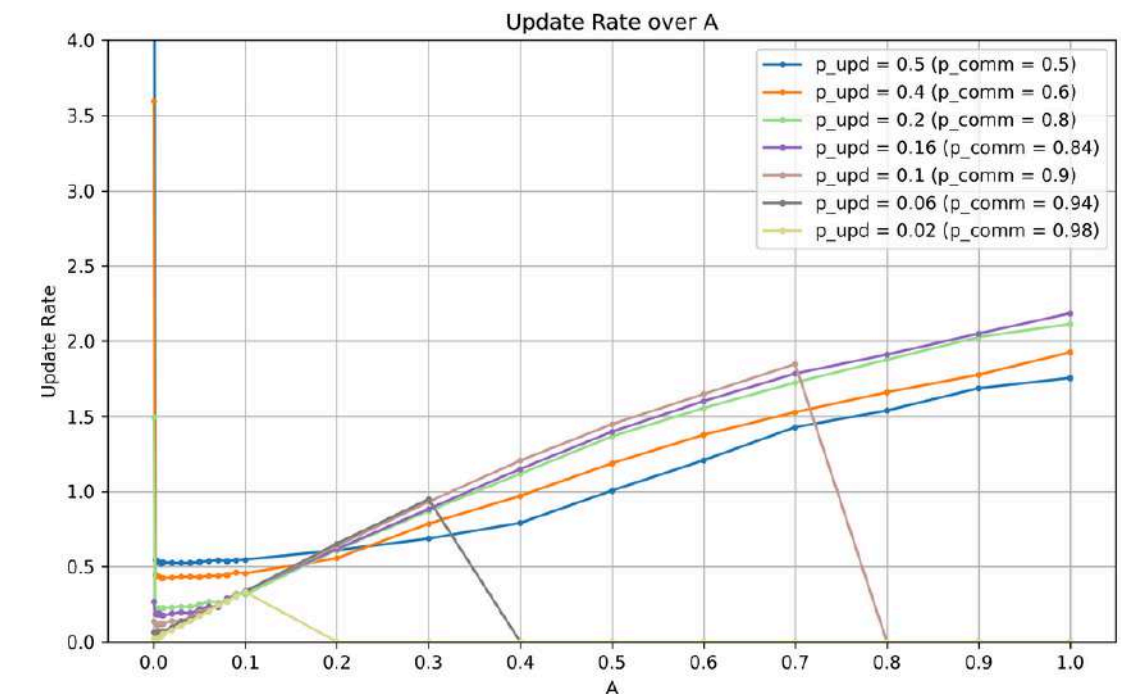
- знижується зі збільшенням  $A$
- при високих  $A$  не залежить від  $p_{comm}$



Середній вік агентів в залежності від  $A$

## Частота оновлення популяції $r_{upd} = \frac{L^2}{K} \times p_{upd}$

- зростає зі збільшенням  $A$
- не залежить від розміру популяції ( $L=20, 30, 40$ )
- значення є близькими для різних  $p_{upd}$
- → параметр  $A$  визначає частоту оновлення, необхідну для виживання популяції в умовах впливу віку на  $p_{surv}$
- → незалежно від  $p_{upd}$ , популяція адаптується (вимираючи) для підтримки необхідного  $r_{upd}$



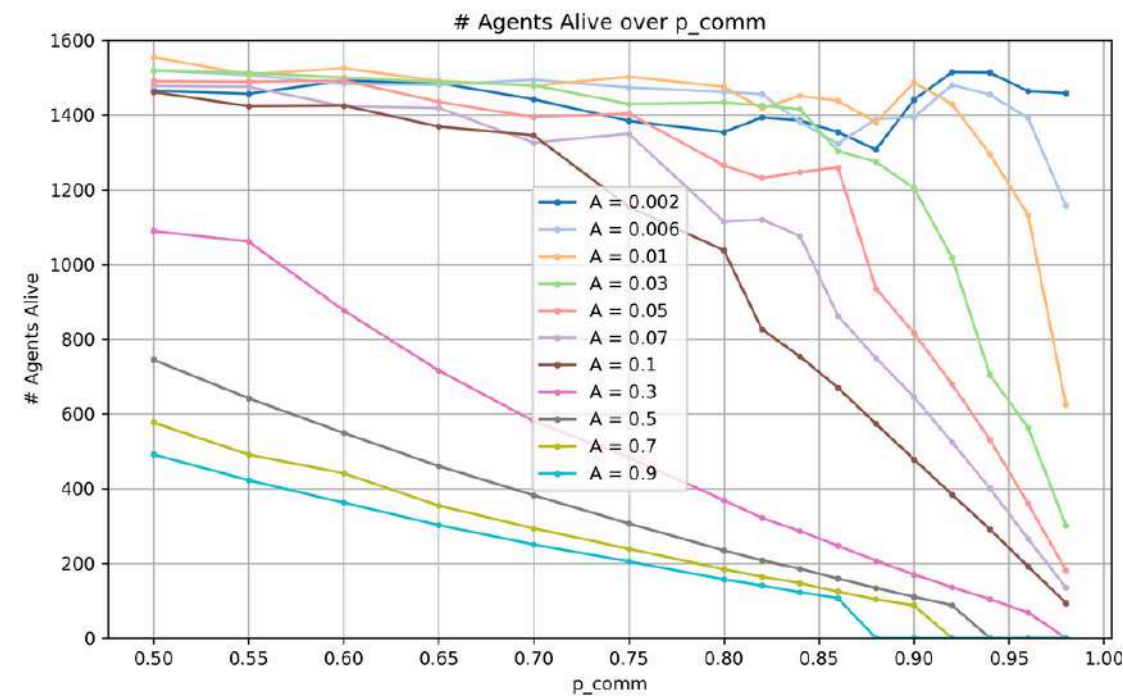
$r_{upd}$  в залежності від  $A$

# Особливості параметрів $A$ , $p_{comm}$

Продовження

## Кількість живих агентів у популяції

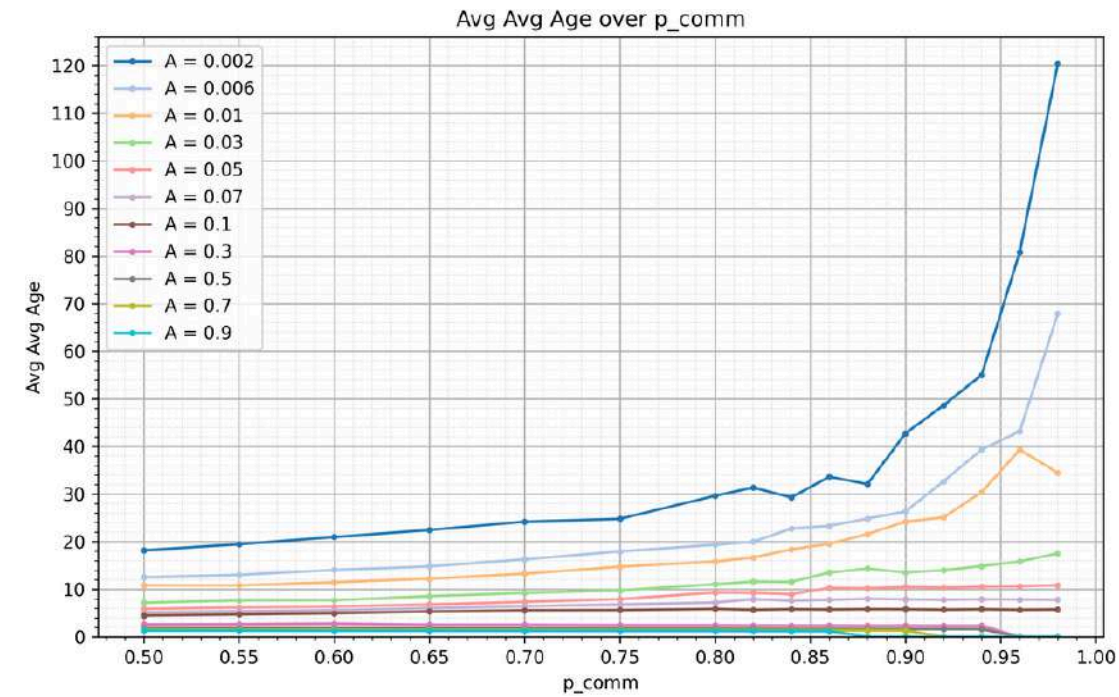
- Збільшення  $p_{comm}$  (зменшення  $p_{upd}$ ) призводить до зменшення чисельності агентів і вимирання
- Більш стрімке зниження чисельності зі збільшенням  $A$



Кількість агентів в залежності від  $p_{comm}$

## Середній вік агентів

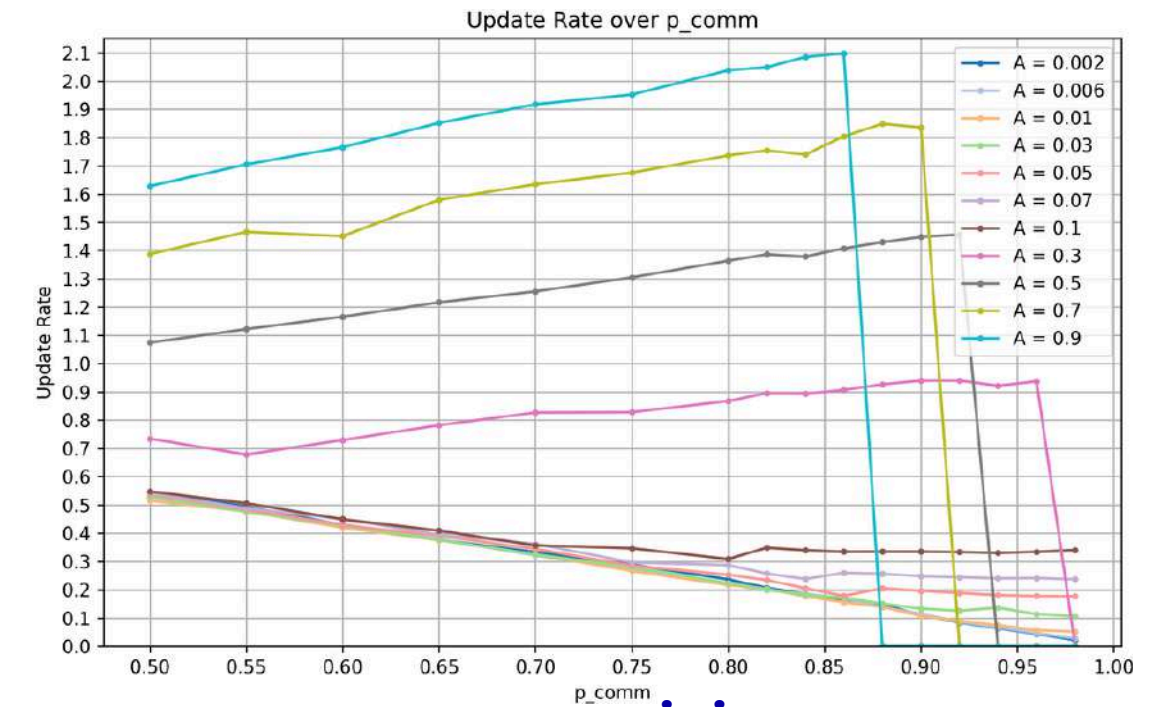
- зростає зі збільшенням  $p_{comm}$
- при високих  $A$  не залежить від  $p_{comm}$



Середній вік агентів в залежності від  $p_{comm}$

## Частота оновлення популяції

- **низькі  $A$ :** знижується зі збільшенням  $p_{comm}$  та залишається сталою на проміжках високої  $p_{comm}$ , де залежить тільки від  $A$
- **високі  $A$ :** зростає зі збільшенням  $p_{comm}$
- не залежить від розміру популяції ( $L=20, 30, 40$ )



$p_{upd}$  в залежності від  $p_{comm}$

# Мутація успадкованої навчальної здібності

## Власні модифікації

**Мета:** більш природний механізм мутації

### Мутація

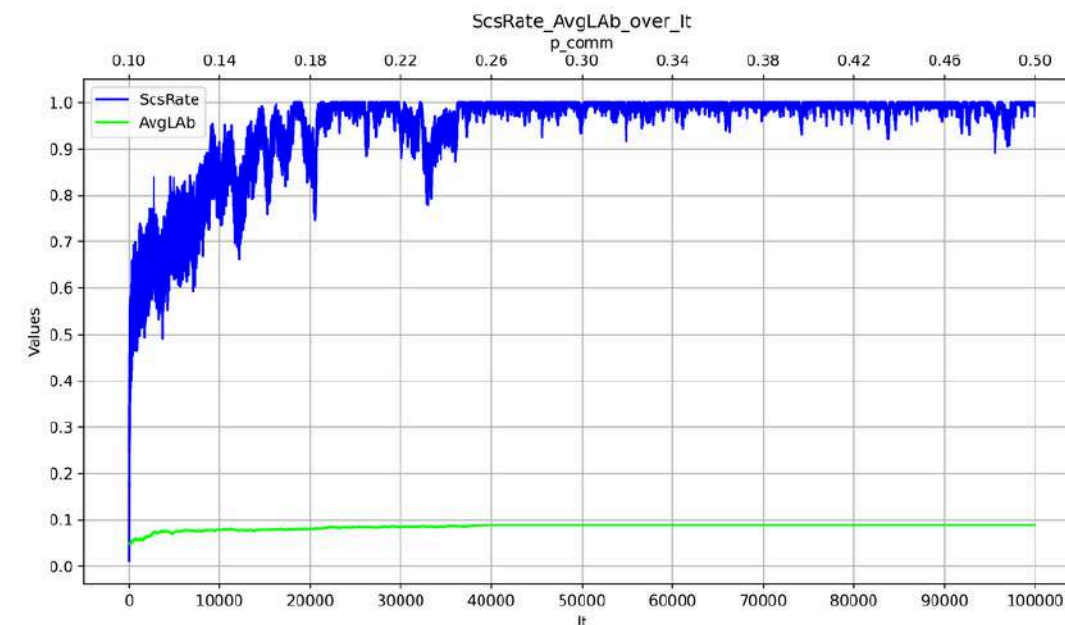
$$l_{child} = l_{parent-at-birth} + N(0, \sigma)$$

### Вплив параметра

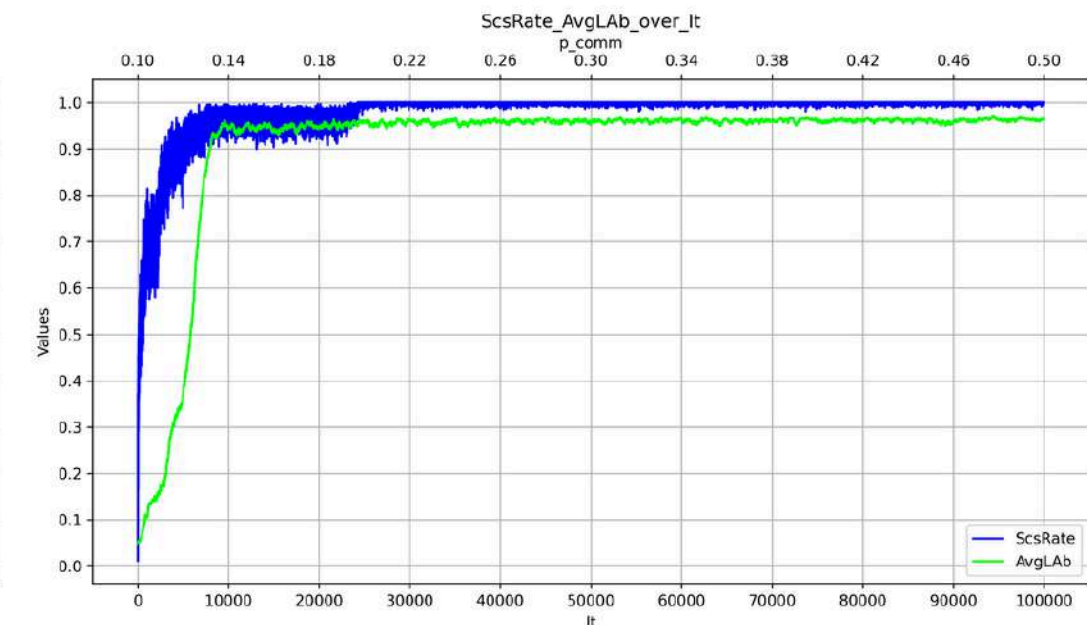
$\sigma$	$l, t=100000$	$p_{comm}$ БП
0	0.088	—
0.01	0.965	$\approx 0.135$
0.05	0.906	$\approx 0.11$
5	0.807	$\approx 0.1$

- модель залишається стійкою
- мутація прискорює розвиток популяції
- мутація обмежує максимальне значення навч. здібності
- успішність є високою

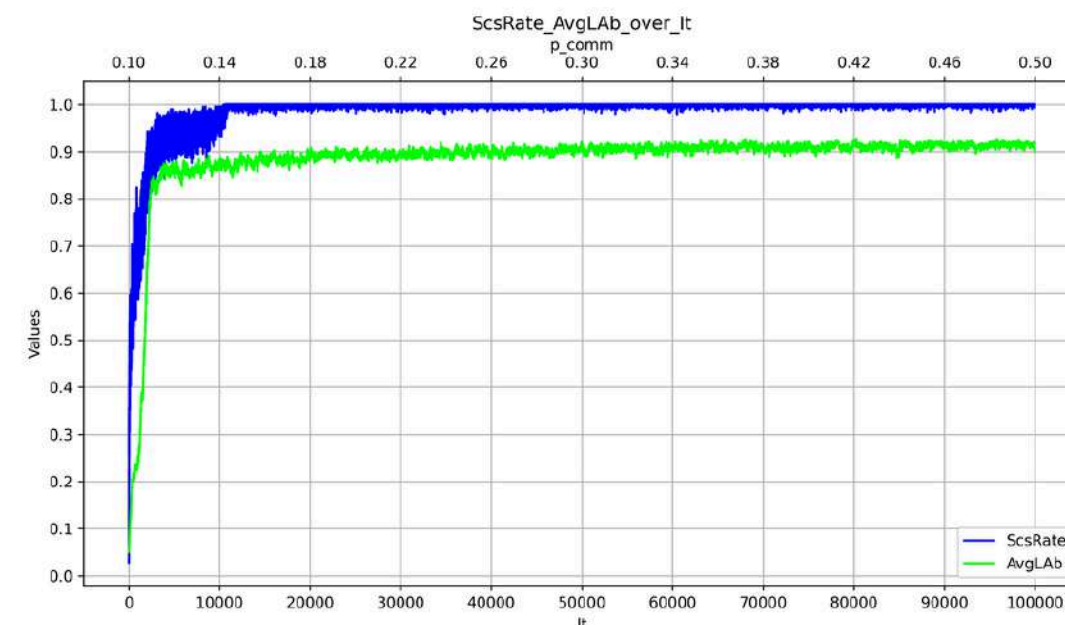
### Лінійне збільшення $p_{comm}$



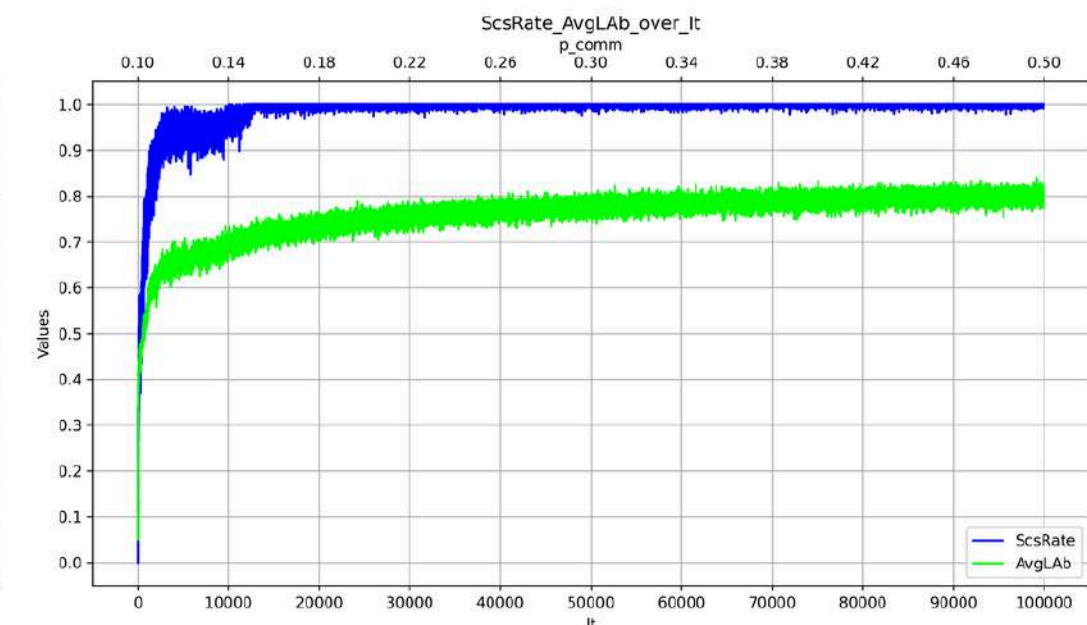
$\sigma = 0$



$\sigma = 0.01$



$\sigma = 0.05$



$\sigma = 5$

# Вікове зниження навчальної здібності

Власні модифікації

**Мета:** симуляція впливу старіння мозку

**Зміна здатності до навчання з віку  $\tau$**

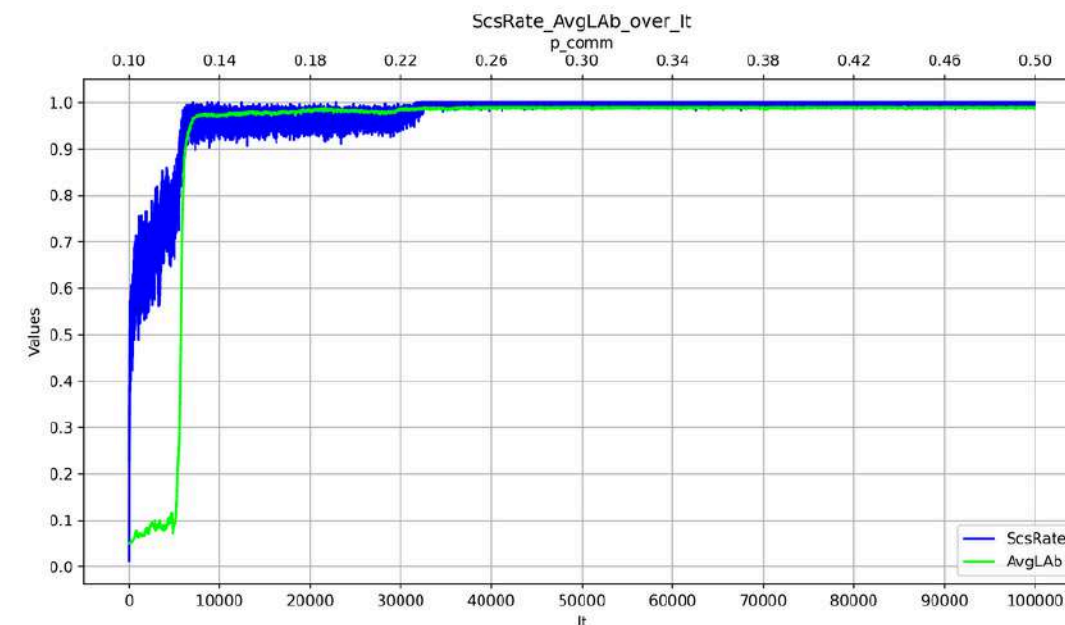
$$l(t + 1) = l(t) - l_{at\_birth} \times 0.01$$

**Вплив параметра**

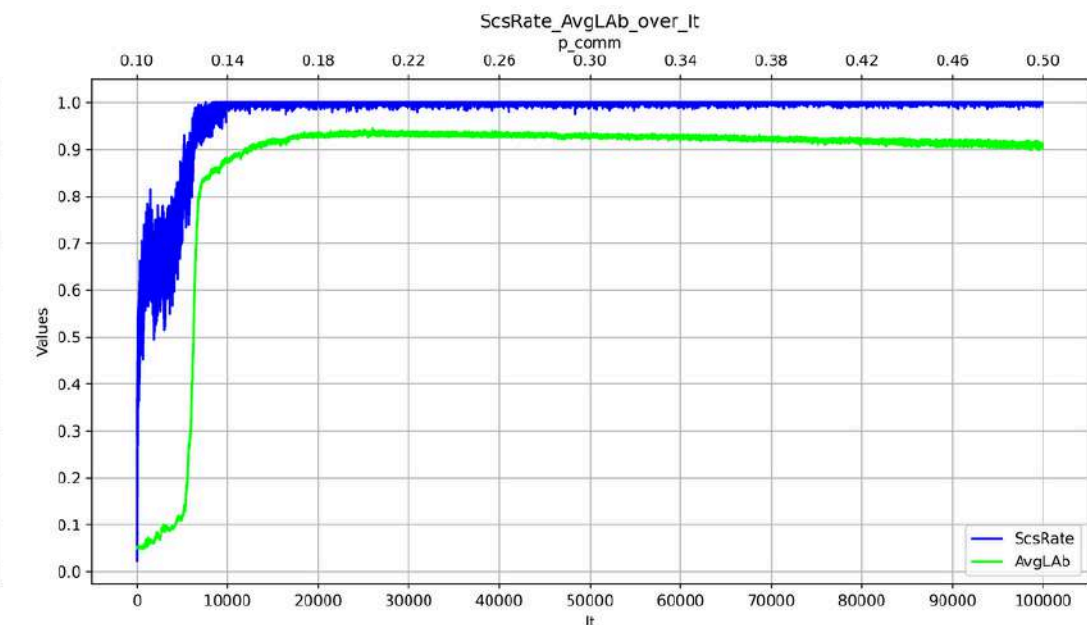
$\tau$	$l$	$l_{at\_birth}$	$l_{max}$
$\infty$	0.99	0.99	0.99
8	0.908	0.99	0.95
3	0.868	0.99	0.91
0	0.829	0.973	0.865

- модель залишається стійкою
- обмежує максимальне значення навч. здібності
- навч. зд. з часом повільно знижується

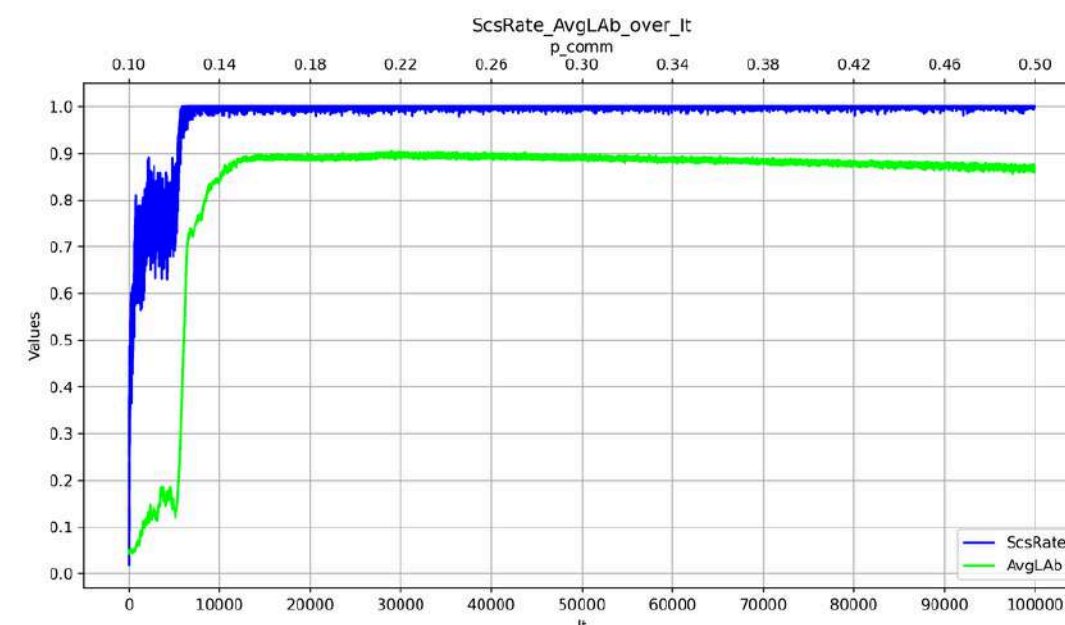
Лінійне збільшення  $p_{comm}$



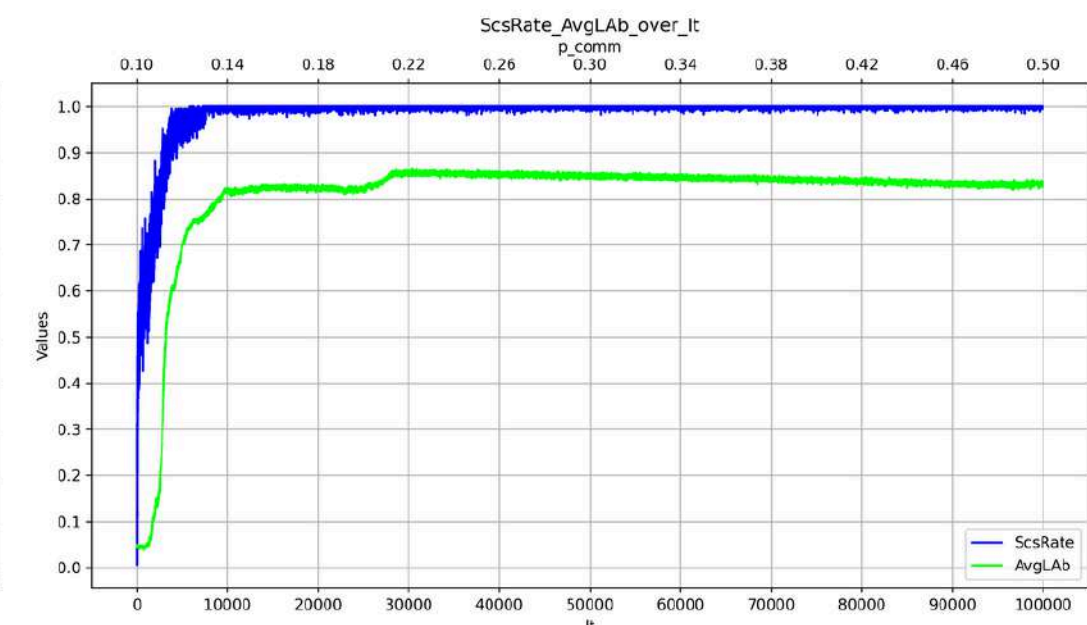
$\tau = \infty$



$\tau = 8$



$\tau = 3$



$\tau = 0$

# Модифікована функція пристосованості

## Власні модифікації

**Мета:** симуляція соціокультурного впливу

**Середній зважений рівень знань популяції з коефіцієнтом  $\alpha$**

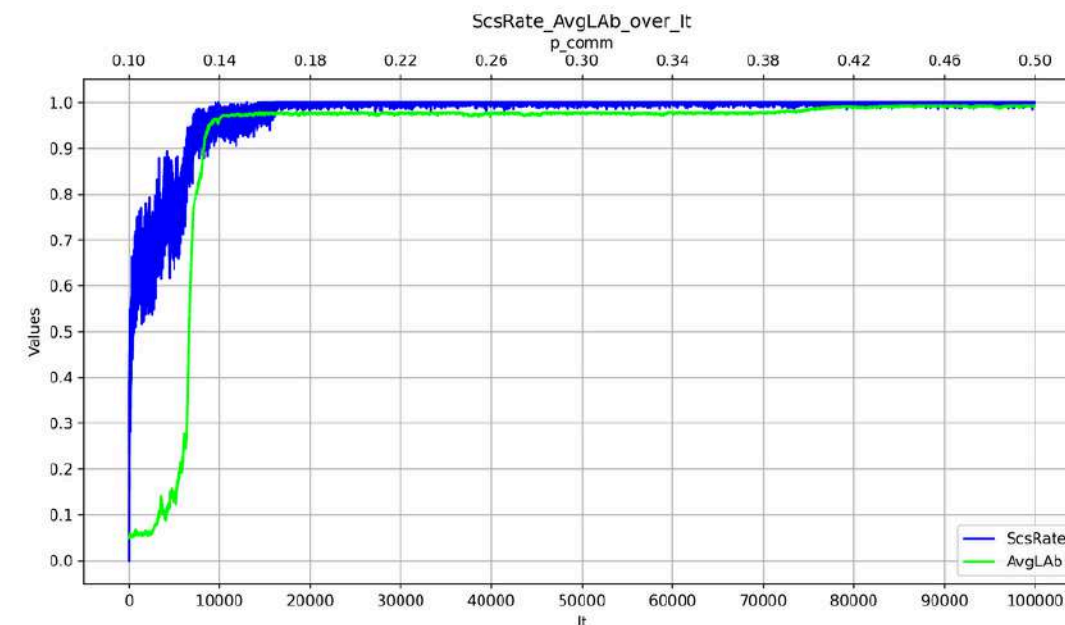
$$W_m = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left( \sum_{j=1}^N (w_j \in \lambda_k) \right) \times \alpha$$

**Вплив параметра**

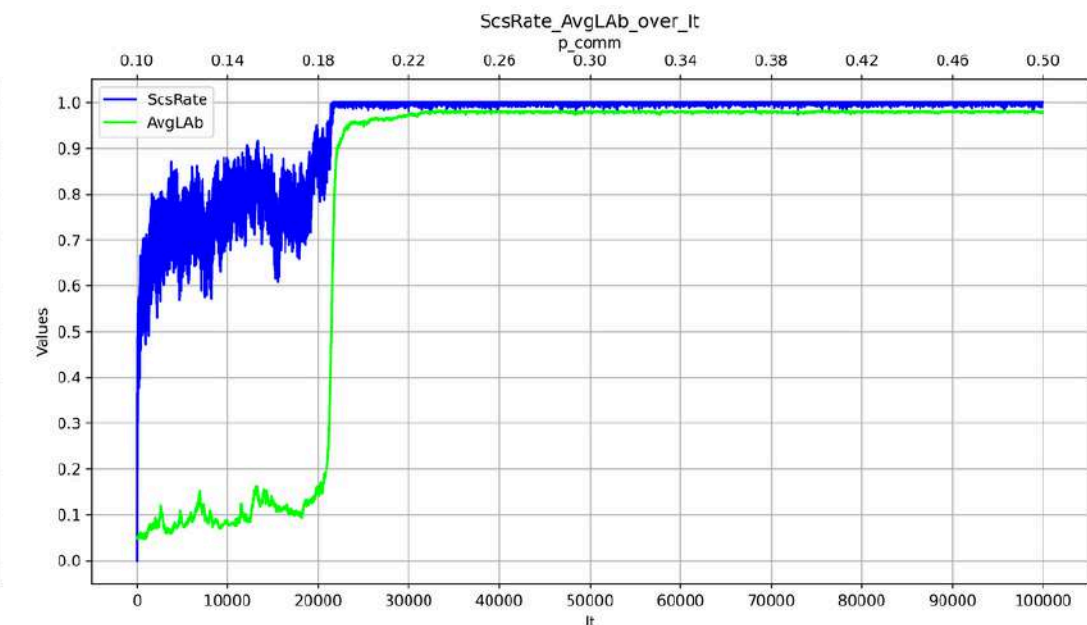
$\alpha$	$p_{comm}$ БП	Середній рівень знань, $t=100000$
0.9	$\approx 0.13$	15.765
0.75	$\approx 0.19$	16.692
0.5	$\approx 0.23$	16.989
0	–	4.963

- висока навчальна здібність формується за рахунок сильного впливу агентів одне на одного

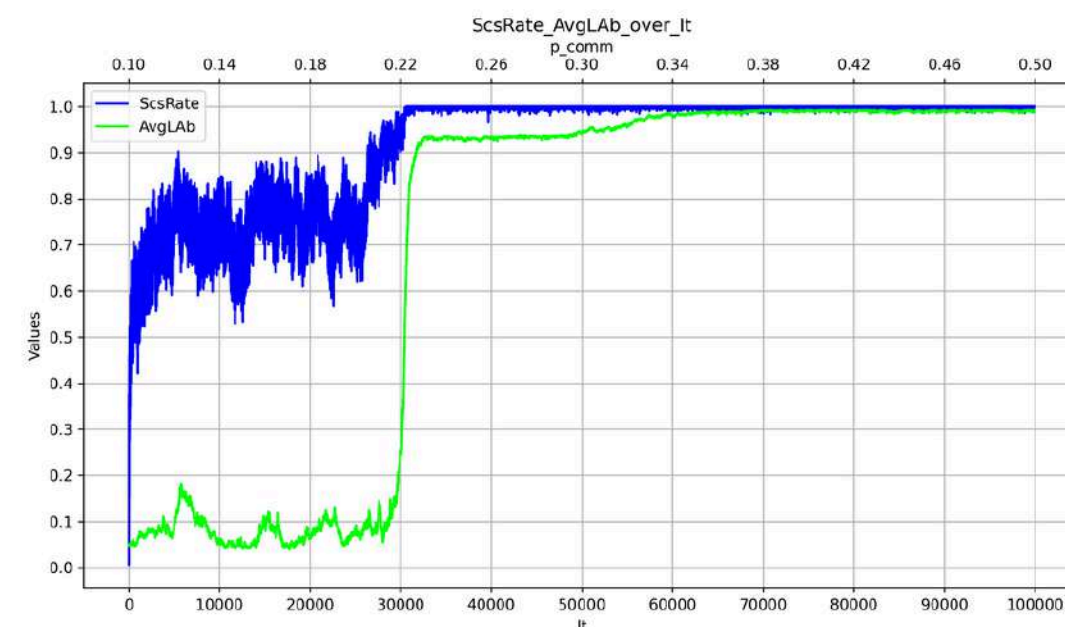
**Лінійне збільшення  $p_{comm}$**



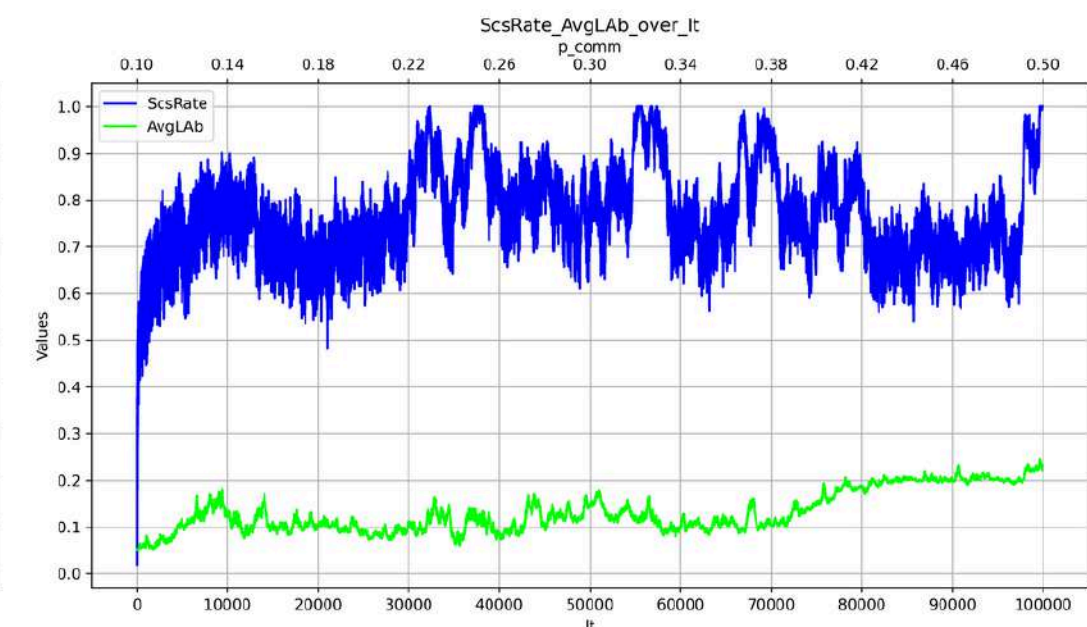
$\alpha = 0.9$



$\alpha = 0.75$



$\alpha = 0.5$



$\alpha = 0$

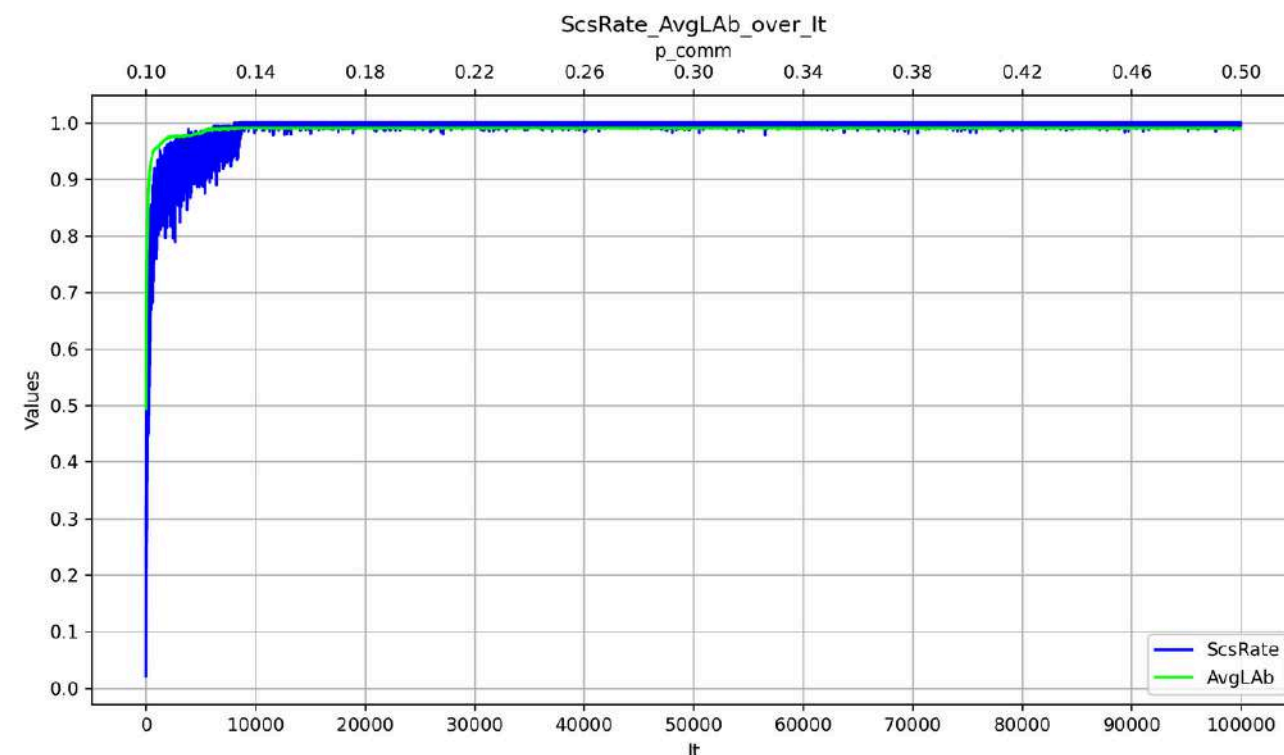
# Поєднання стратегій

## Власні модифікації

**Мета:** наблизити модель до реальних умов

### Параметри

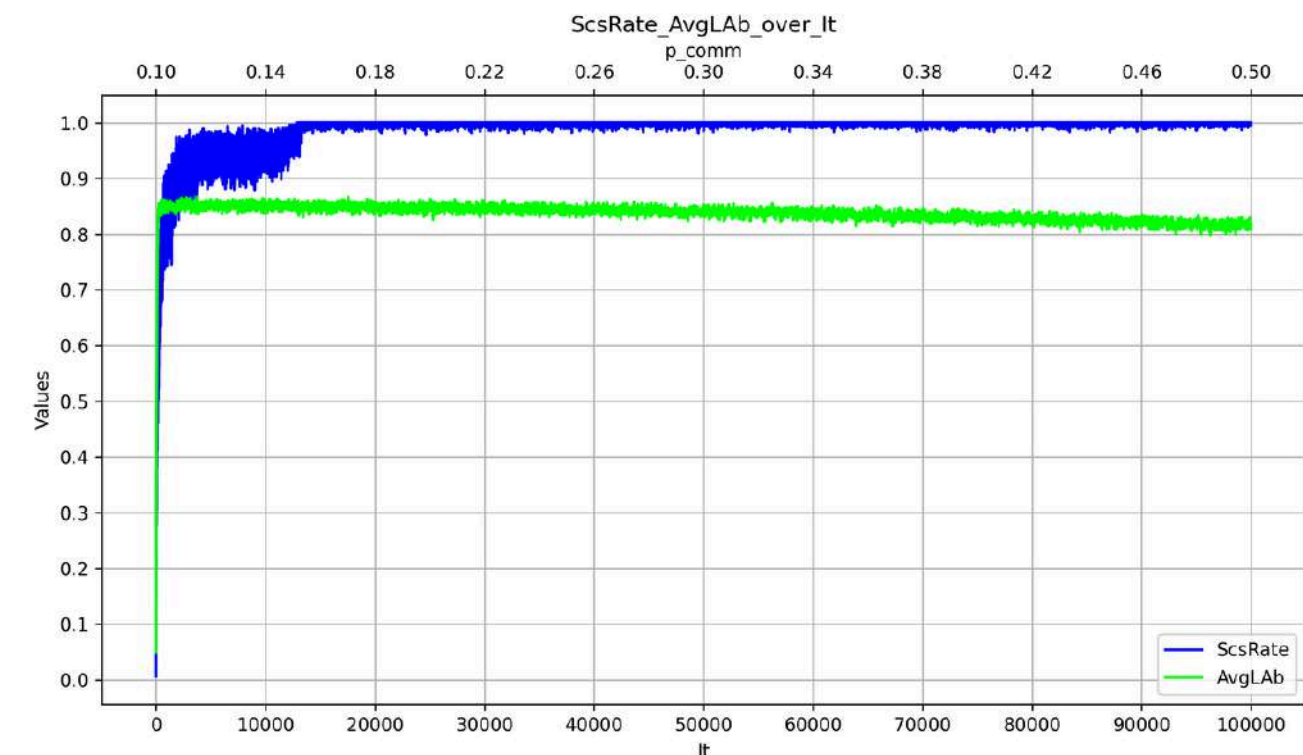
- міра мутації  $\sigma = 0.1$
- вплив решти агентів  $\alpha = 0.9$
- вік старіння  $\tau = 8$



Відтворена стратегія оцінки ваги слів Молоні

### Результат моделювання

- швидкий перехід до успішного стану та повільне зниження здатності до навчання протягом подальшої еволюції



Поєднання стратегій оцінки ваги слів, мутації, вікового зниження навч. зд., функції пристосованості

# Кореляція між мовами та навчальними здібностями

за відсутності мутації, комунікації

**Молоні [2]:** помітною є кореляція між кластеризаціями агентів за мовою та навчальною здібністю.

## Дослідження

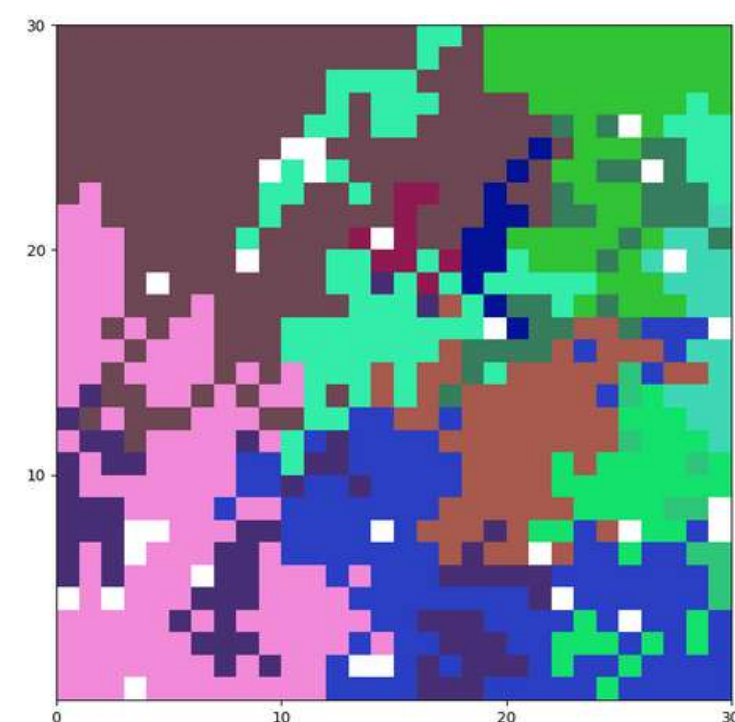
кореляції за відсутності операцій комунікації та мутації ( $p_{comm} = 0, p_{mut} = 0$ )

## Метрики оцінки якості кластеризації

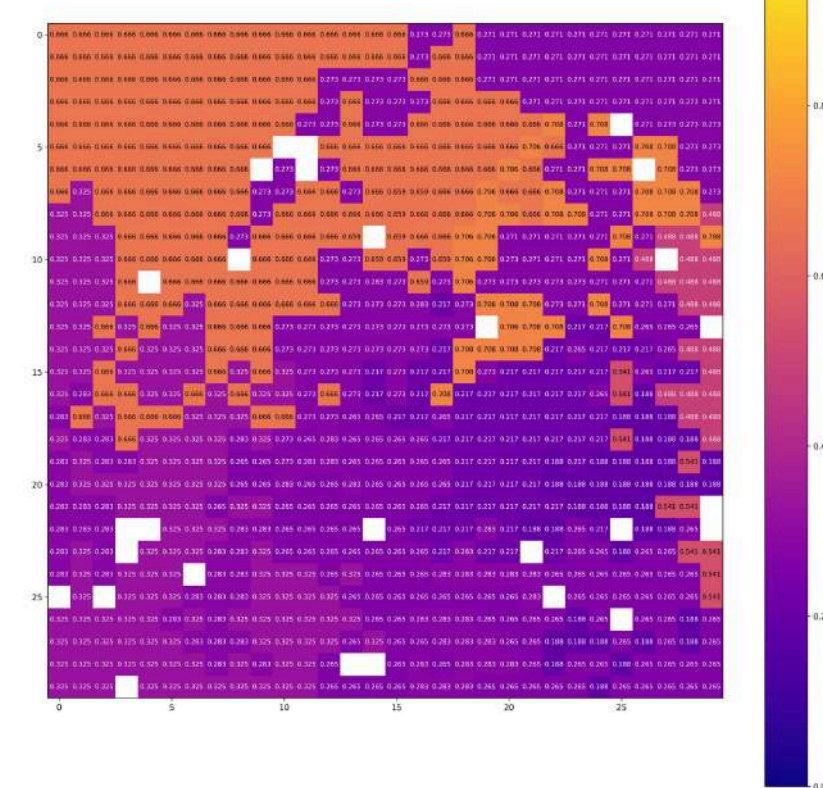
- **Rand Index:**  $[0, 1]$ , 1 - повна узгодженість, 0.5 - випадкова
- **Adjusted Rand Index:**  $[-1, 1]$ , 1 - повна узгодженість, 0 - випадкова

## Ідеальна кореляція кластеризацій

Метрика	Mean	Median	Std. dev.	Вибірка
RI	1	1	0	5
ARI	1	1	0	5



Мовні кластери



Кластери за навчальною здібністю

# Кореляція між мовами та навчальними здібностями

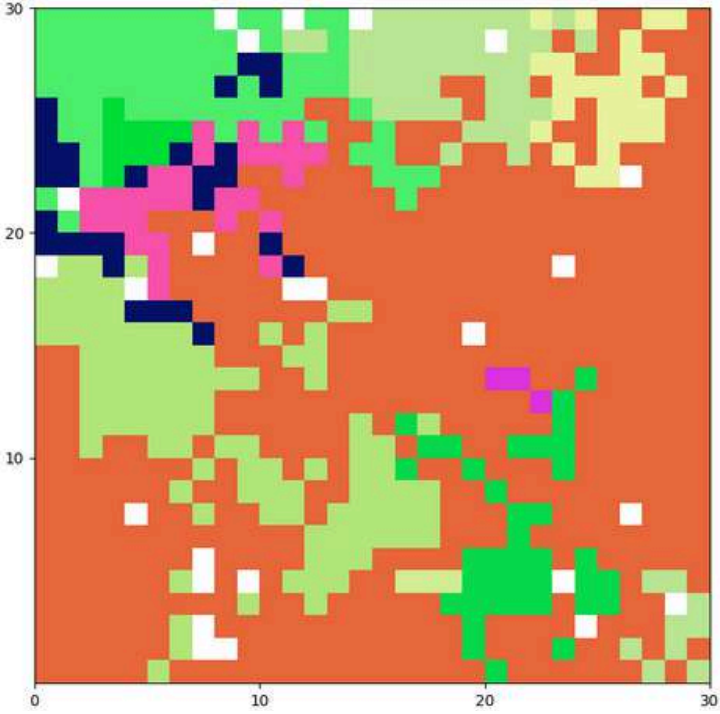
за відсутності комунікації

## Дослідження

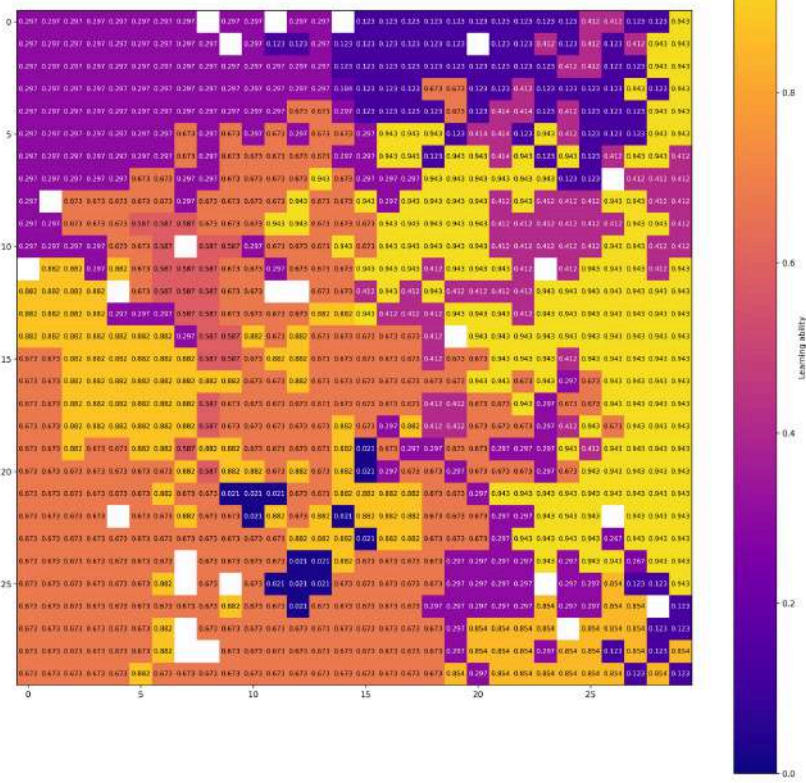
кореляції за відсутності операцій комунікації ( $p_{comm} = 0$ )

### Кореляція зберігається при застосуванні мутації

Метрика	$p_{mut}$	Mean	Median	Std. dev.	Вибірка
RI	0.0001	0.975	0.992	0.035	5
	0.001	0.723	0.744	0.136	5
	0.005	0.911	0.918	0.037	5
	0.01	0.946	0.949	0.019	5
	0.5	0.999	0.999	0	5
ARI	0.0001	0.945	0.983	0.079	5
	0.001	0.410	0.412	0.219	5
	0.005	0.534	0.537	0.113	5
	0.01	0.536	0.537	0.091	5
	0.5	0.349	0.348	0.028	5



Мовні кластери



Кластери за навчальною здібністю

# Кореляція між мовами та навчальними здібностями

за комунікації та мутації

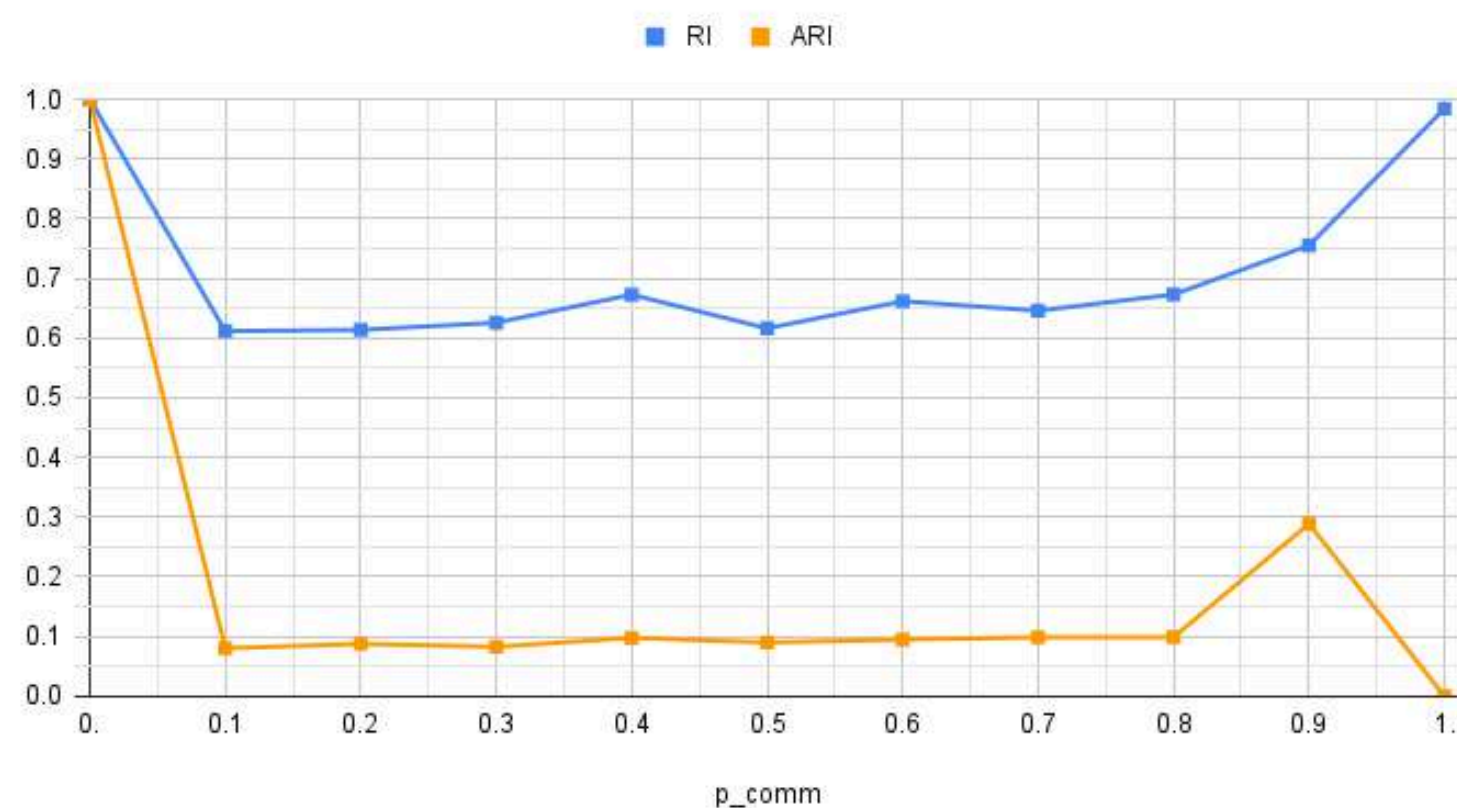
## Дослідження

- кореляції за відсутності мутації ( $p_{mut} = 0$ ) при зміні  $p_{comm}$
- кореляція за низької мутації ( $p_{mut} = 0.001$ ) при зміні  $p_{comm}$

Низька кореляція при застосуванні комунікації,  $p_{mut} = 0$

**RI  $\approx$  0.653, ARI  $\approx$  0.113** (без урахування значень при  $p_{comm} = 0, 1$ )

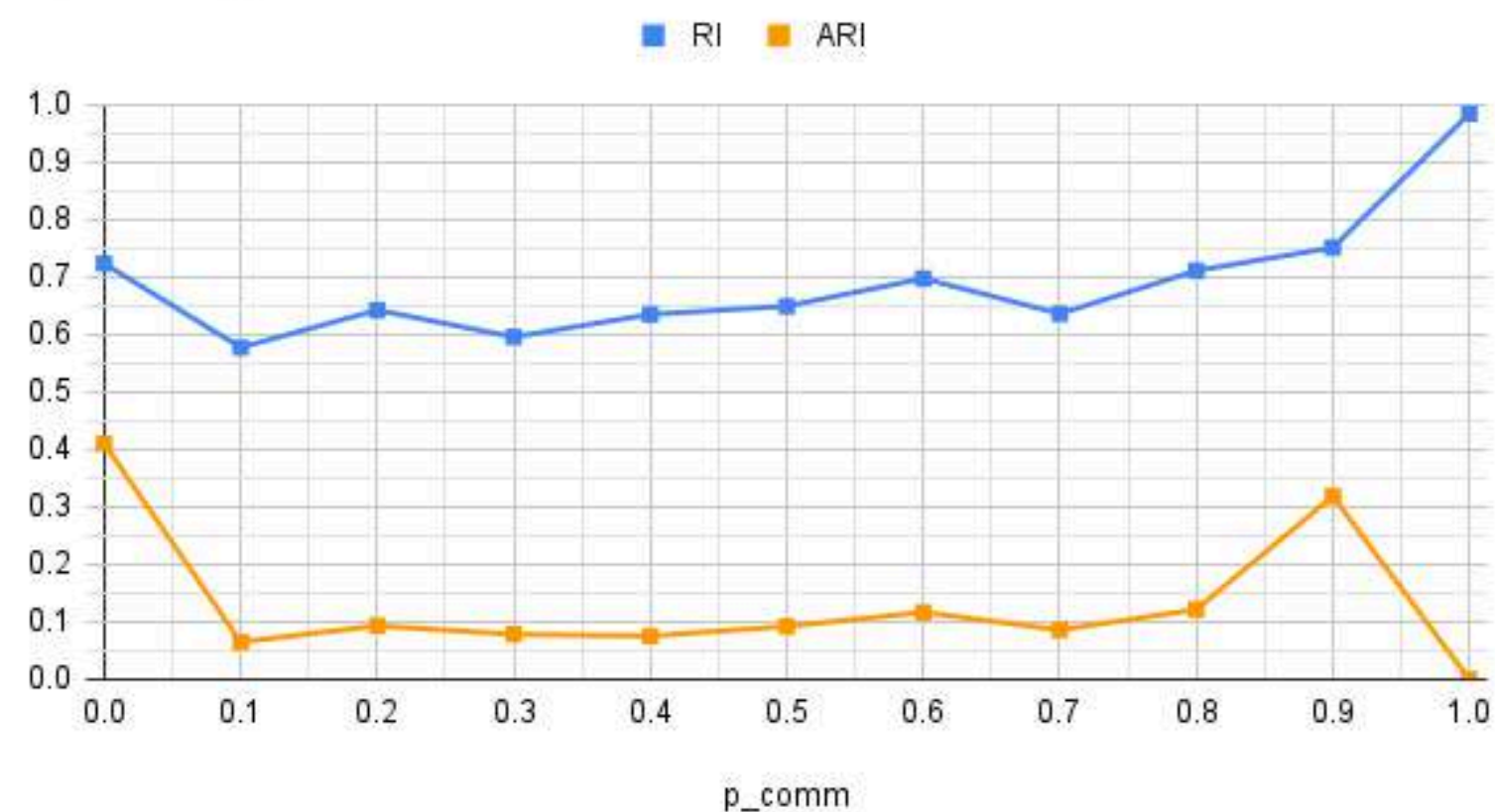
RI, ARI over  $p_{comm}$



Низька кореляція при застосуванні комунікації,  $p_{mut} = 0.001$

**RI  $\approx$  0.655, ARI  $\approx$  0.116** (без урахування значень при  $p_{comm} = 0, 1$ )

RI, ARI over  $p_{comm}$



# Результати та висновки

## Результати

1. Встановлено невідповідності в роботах Ліповської та Молоні.
2. Відновлено лістинги, які відповідають алгоритму Ліповської згідно з діаграмою.
3. Імплементовано модель Ліповської з модифікацією Молоні та можливістю розширення.
4. Відтворено експерименти Ліповської та Молоні з результатами, близькими до оригінальних.
5. Встановлено вплив змін Молоні, модифікацій параметрів і стратегій на модель Ліповської.
6. Запропоновано та проаналізовано власні модифікації алгоритму.
7. Виконано оцінку міри кореляції між кластеризаціями агентів.

## Висновки

- Роботам Ліповської та Молоні властивий **брак доказовості**, помилки, невідповідність результатів та конфігурацій експериментів, **відсутність умов дослідів**.
- **Відтворюваність** моделі є **частковою**, основні тенденції спостерігаються.
- Зміна значень параметрів моделі призводить до **передбачуваних** результатів (окрім параметра A), що свідчить про **стійкість моделі**.
- Поведінка виправленої моделі Молоні **не відрізняється** від моделі Ліповської.
- **Запропоновані** нами стратегії не порушують динаміки моделі, дозволяють розширити її умовами, **наближеними до природних**.
- **Кореляція** між мовою та навчальною здібністю агентів є **низькою**.

# Наявні обмеження та майбутні дослідження

## Обмеження

1. Параметри експериментів Ліповської та Молоні було адаптовано з огляду на обмежений часовий та обчислювальний ресурс.
2. Результати деяких експериментів проаналізовано на основі 1 запуску.

## Пропозиції досліджень

1. Формальний аналіз залежності кількості агентів та частоти оновлення популяції від параметрів  $A$ ,  $p_{comm}$ .
2. Дослідження швидкості поширення мови та виникнення запозичень при об'єднанні кластерів із власними мовами (переселення агентів і сполучення територій).

# Використані джерела

1. Dorota Lipowska. (2011). Naming Game and Computational Modelling of Language Evolution. ICHB PAS Poznan Supercomputing and Networking Center. URL: <https://doi.org/10.12921/CMST.2011.17.01.41-51>
2. Moloney P. Evolutionary Naming Game: an Agent-based Model for the Emergence of Language : M.Sc. Computer Science / Trinity College Dublin. Dublin, 2021. 37 с. URL: <https://publications.scss.tcd.ie/theses/diss/2021/TCD-SCSS-DISSERTATION-2021-042.pdf> (дата звернення: 10.11.2024).
3. Lipowski, A., Lipowska, D. (2008). Bio-linguistic transition and Baldwin effect in an evolutionary naming-game model. International Journal of Modern Physics C, 19(03), 399–407. URL: <https://doi.org/10.1142/s0129183108012248>

**Дякую за увагу**