

Міністерство освіти і науки України
Національний авіаційний університет
Навчально-науковий інститут комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

Курсовий проект
з дисципліни «Комп'ютерні системи»
Варіант № 8

Виконав:
студент ННІКІТ
групи СП-325
Клокун В. Д.
Перевірив:
Жуков І. А.

Київ 2019

ЗМІСТ

1	Завдання	3
2	Теоретичні відомості	4
3	Хід виконання роботи	6
3.1	Визначення порядку нумерації процесорів у кластерах системи при масштабуванні	6
3.1.1	Топологія «Лінійка»	6
3.1.2	Топологія «Зірка»	8
3.1.3	Топологія «Кільце»	10
3.1.4	Топологія «Решітка»	11
3.2	Визначення кількості процесорів, які додаються на кожному кроці масштабування	14
3.3	Опис внутрішньо- та міжкластерних зв'язків при масштабуванні	14
3.4	Обчислення топологічних характеристик	14
3.5	Побудова графіків	17
3.6	Порівняльний аналіз	19
4	Висновок	23
5	Список використаної літератури	24

1. ЗАВДАННЯ

Варіант завдання на курсовий проект визначався за списком групи, тому необхідно виконати варіант № 8, в якому необхідно дослідити топологічні характеристики паралельних обчислювальних систем з масивно-паралельними архітектурами за заданим кластером (рис. 1).

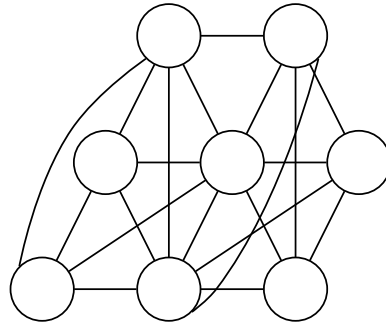


Рис. 1: Граф заданого кластера

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Метою курсової роботи є дослідження основних топологічних характеристик паралельних обчислювальних систем з масивно-паралельними архітектурами (massive parallel processing, MPP-системи).

MPP-системи — це багатопроцесорні системи з розподіленою (локальною) оперативною пам'яттю. Їхня основна перевага — необмежена масштабованість (можливість збільшення кількості процесорів у системі без зміни її властивостей). У зв'язку із цим MPP-систем містять сотні, тисячі процесорів. Так, у цей час, найбільш продуктивні MPP-системи у світі містять близько мільйона процесорів. Відомо два способи взаємозв'язків між процесорами в MPP-системі:

- статичний, коли процесори зв'язані за допомогою спеціальних двунправлених каналів;
- динамічний, коли для взаємозв'язків між процесорами використовують комутатори.

У першому випадку процесори в MPP-системах можуть поєднуватися в різні топології, а в другому випадку — являють собою тільки повнозв'язану топологію.

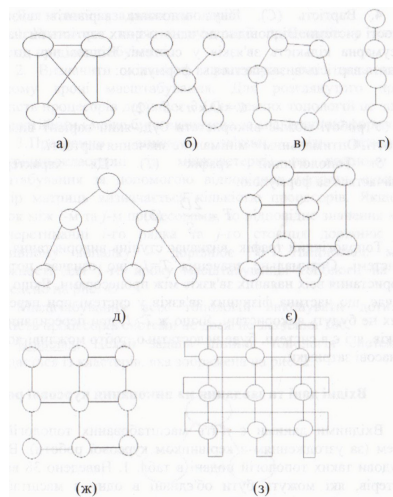


Рис. 2: Приклади топологій MPP-систем: а) — повнозв'язана система, б) — зірка, в) — кільце, г) — лінійка, д) — дерево, е) — гіперкуб 3-го порядку, ж) — решітка, з) — тор

У даній роботі розглядається MPP-системи зі статичними взаємозв'язками. Для таких систем існує множина топологічних характеристик. Основними топологічними характеристиками є:

1. Діаметр системи (D) — це мінімальна відстань між двома максимально віддаленими процесорами. Наприклад, діаметр для повнозв'язаної системи дорівнює 1, а для топології «зірка» дорівнює 2. Діаметр кільцевої то-

пології дорівнює $n/2$, а лінійної топології дорівнює $(n - 1)$, де n — кількість процесорів у системі. Оптимальним є мінімальне значення діаметра. Приклади різних графів топологій систем наведені на рис. 2.

2. Середній діаметр (\bar{D}). Ця характеристика визначається за формулою:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n-1} d_{ij}}{n(n-1)} \quad (1)$$

де d_{ij} — мінімальна відстань між i -м та j -м процесорами. Оптимальним є мінімальне значення середнього діаметра.

3. Степінь (S). Ця характеристика визначається як максимальна кількість дуг (зв'язків), інцидентні вершині (процесору) у графі топології системи. Так, степінь лінійної й кільцевої топології дорівнює 2, повнозв'язної топології дорівнює $(n - 1)$.
4. Вартість (C). Існує множина варіантів визначення вартості системи. Відповідно до одного з них вартість визначається як сумарна кількість зв'язків у системі. Відповідно до іншого варіанта вартість визначається за формулою:

$$C = DnS. \quad (2)$$

У роботі можна використати будь-який варіант визначення вартості. Оптимальним є мінімальне значення вартості.

5. Топологічний трафік (T). Ця характеристика визначається за формулою:

$$T = \frac{2\bar{D}}{S}. \quad (3)$$

Топологічний трафік визначає степінь використання зв'язків у системі. Оптимальне значення $T = 1$, що означає потенційне використання всіх наявних зв'язків між процесорами. Якщо $T < 1$, це означає, що частина фізичних зв'язків у системі при пересиланні даних не будуть використані. Якщо ж $T > 1$, при пересиланні даних зв'язків, які є в системі, буде недостатньо, тобто можливі додаткові тимчасові затримки.

3. ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

3.1. *Визначення порядку нумерації процесорів у кластерах системи при масштабуванні*

Спочатку визначимо порядок нумерації процесорів у заданому кластері. Будемо нумерувати процесори зліва-направо, зверху вниз. Визначившись з порядком, побудуємо відповідний граф заданого кластера (рис. 3).

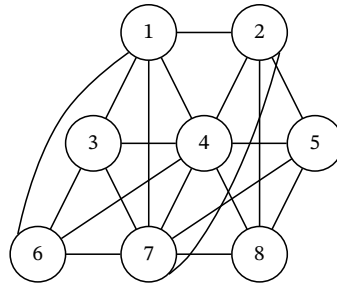


Рис. 3: Граф-схема заданого кластера з пронумерованими вершинами

Пронумерувавши кластер та побудувавши його граф-схему, переходимо до наступного етапу — масштабування систем за топологіями.

3.1.1. Топологія «Лінійка»

Як зрозуміло з назви, топологія «Лінійка» масштабується лінійно: кожен кластер послідовно під'єднується до обраної вершини попереднього кластера. Промасштабуємо заданий кластер для топології «Лінійка» (рис. 4, 5, 6, 7).

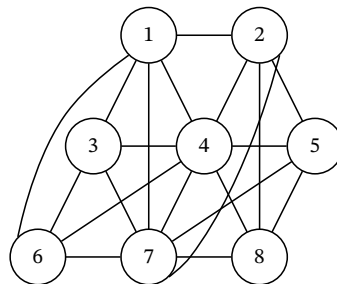


Рис. 4: Масштабування топології «Лінійка», крок 1

На кроці 4 (рис. 7) вже видно, за яким принципом масштабується топологія «Лінійка», тому завершуємо її масштабування.

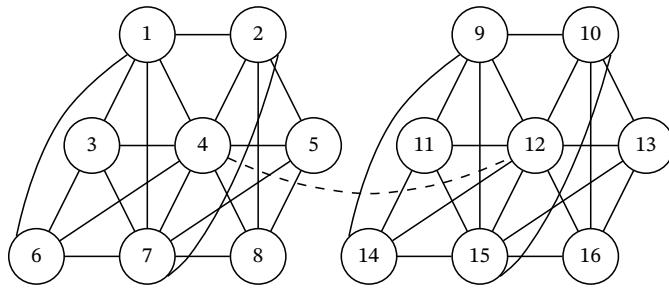


Рис. 5: Масштабування топології «Лінійка», крок 2

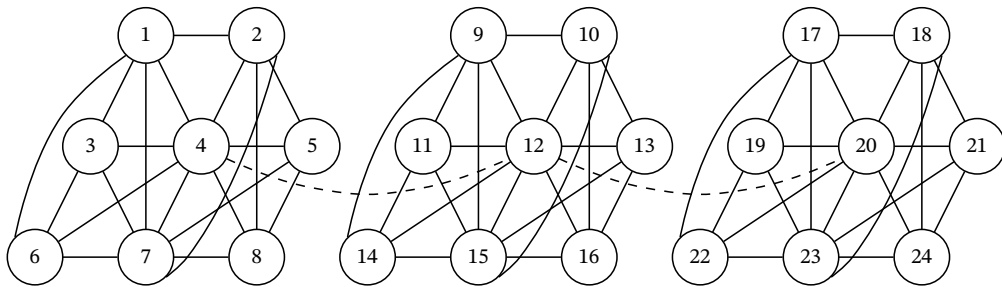


Рис. 6: Масштабування топології «Лінійка», крок 3

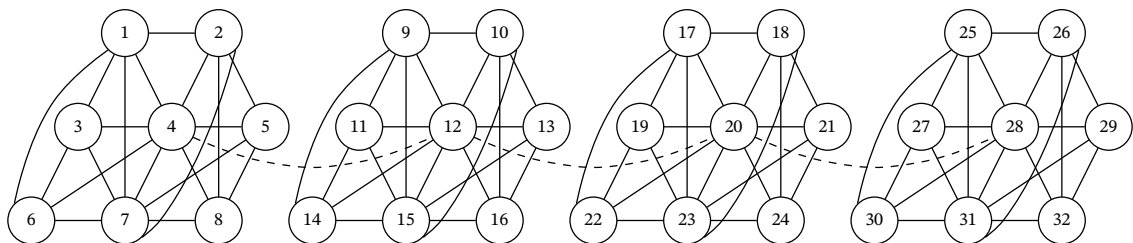


Рис. 7: Масштабування топології «Лінійка», крок 4

3.1.2. Топологія «Зірка»

При використанні топології «Зірка» кожен новий кластер під'єднується до обраної вершини центрального кластера. Виконаємо масштабування заданого кластера для топології «Зірка» (рис. 8, 9, 10, 11).

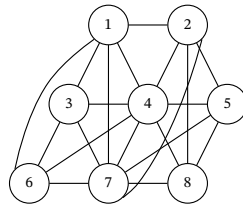


Рис. 8: Масштабування топології «Зірка», крок 1

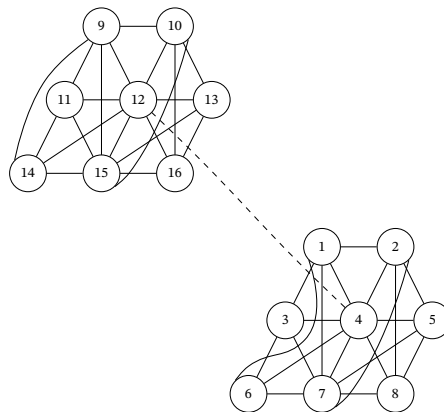


Рис. 9: Масштабування топології «Зірка», крок 2

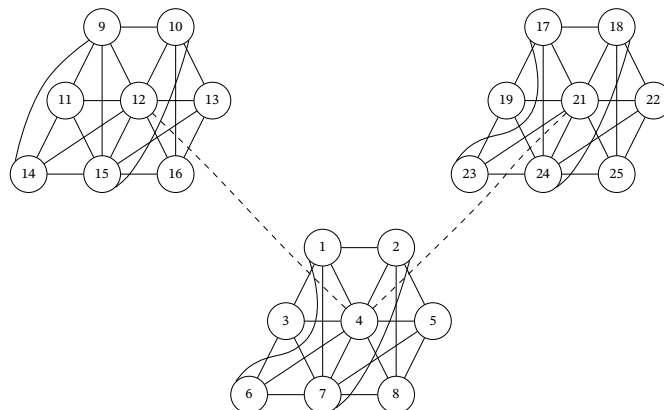


Рис. 10: Масштабування топології «Зірка», крок 3

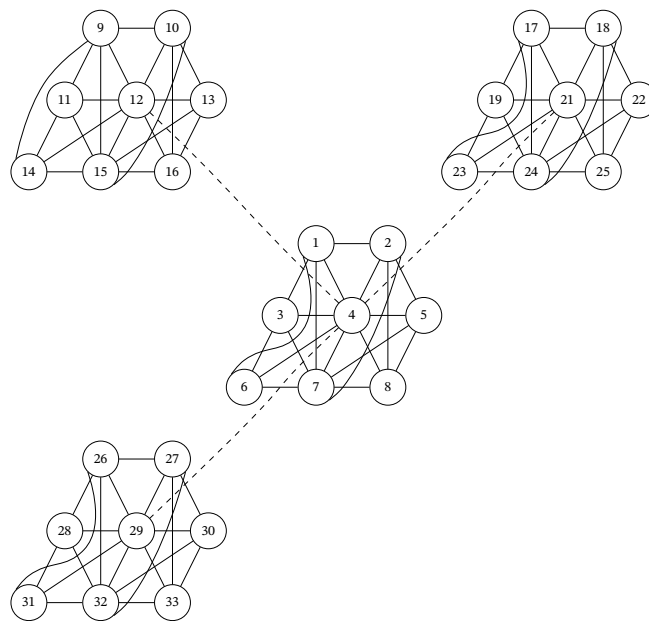


Рис. 11: Масштабування топології «Зірка», крок 4

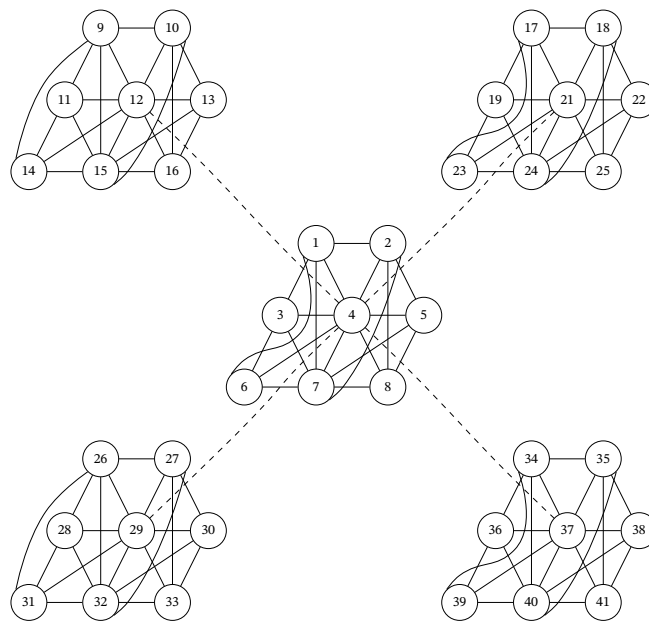


Рис. 12: Масштабування топології «Зірка», крок 5

На кроці 5 (рис. 12) вже наочно видно, за яким принципом масштабується топологія «Зірка», тому завершуємо її масштабування.

3.1.3. Топологія «Кільце»

При використанні топології «Кільце» кожен новий кластер з'єднується з обра-
ною вершиною попереднього кластера, а також останній — з першим, щоб
замкнути кільце. Виконаємо масштабування заданого кластера для топології
«Кільце» (рис. 13, 14, 15, 16, 17).

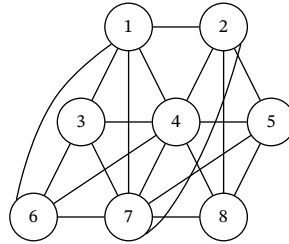


Рис. 13: Масштабування топології «Кільце», крок 1

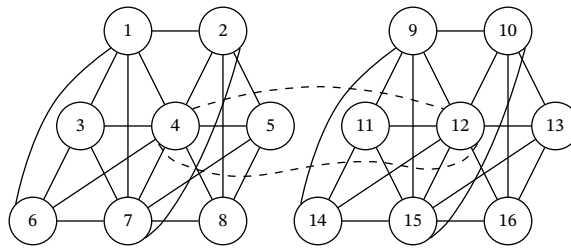


Рис. 14: Масштабування топології «Кільце», крок 2

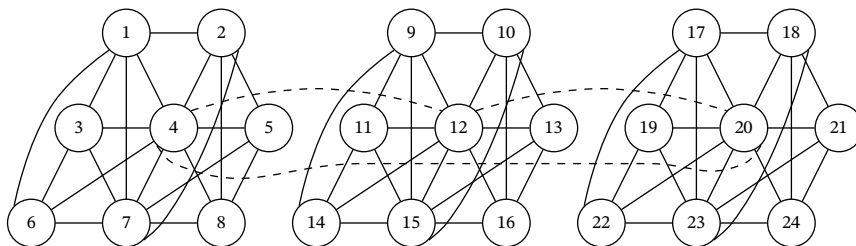


Рис. 15: Масштабування топології «Кільце», крок 3

На кроці 5 (рис. 17) вже наочно видно, за яким принципом масштабується топологія «Кільце», тому завершуємо її масштабування.

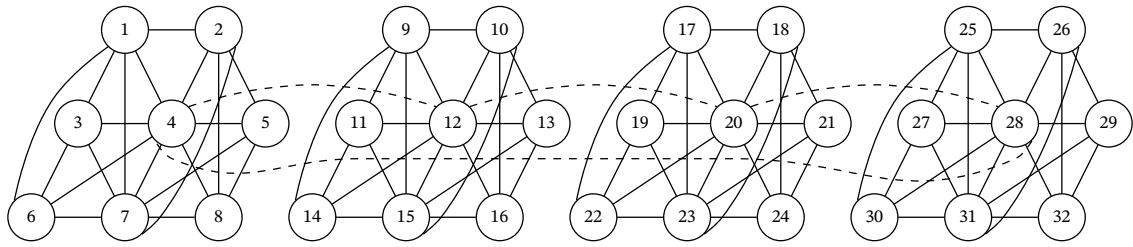


Рис. 16: Масштабування топології «Кільце», крок 4

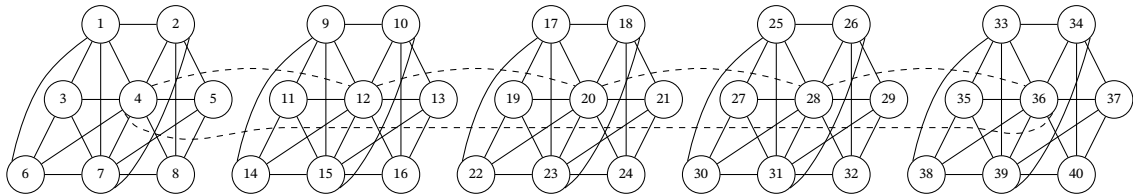


Рис. 17: Масштабування топології «Кільце», крок 5

3.1.4. Топологія «Решітка»

При використанні топології «Решітка» кожен новий кластер під'єднується до обраної вершини своїх двох найближчих сусідів зліва та згори. Нарощування решітки відбувається так: поки решітка не квадратна, і поточний рядок не заповнений, додаємо кластер до поточного рядка. Якщо рядок заповнений, переходимо на новий і повторюємо вищеописані кроки; якщо решітка квадратна — додаємо новий кластер у перший рядок по горизонталі. Виконаємо масштабування заданого кластера для топології «Решітка» (рис. 18, 19, 20, 21).

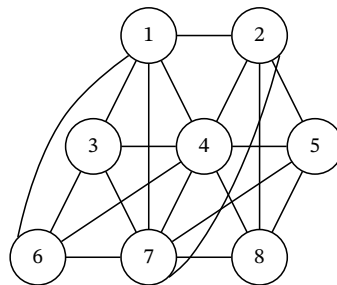


Рис. 18: Масштабування топології «Решітка», крок 1

На кроці 6 (рис. 22) вже наочно видно, за яким принципом масштабується топологія «Решітка», тому завершуємо приклад її масштабування.

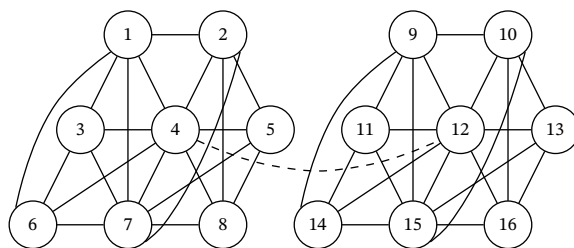


Рис. 19: Масштабування топології «Решітка», крок 2

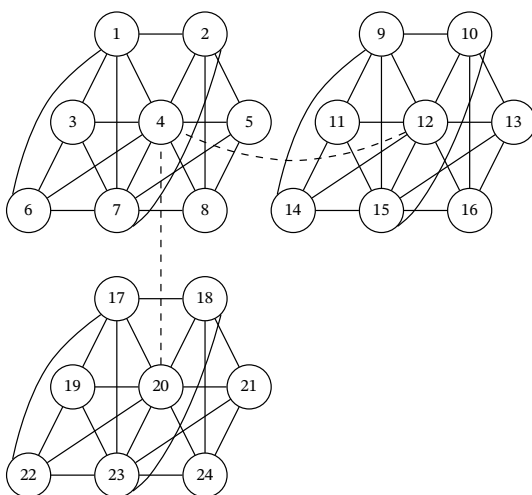


Рис. 20: Масштабування топології «Решітка», крок 3

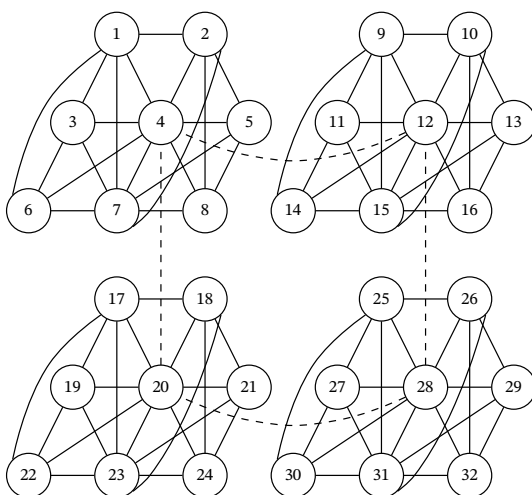


Рис. 21: Масштабування топології «Решітка», крок 4

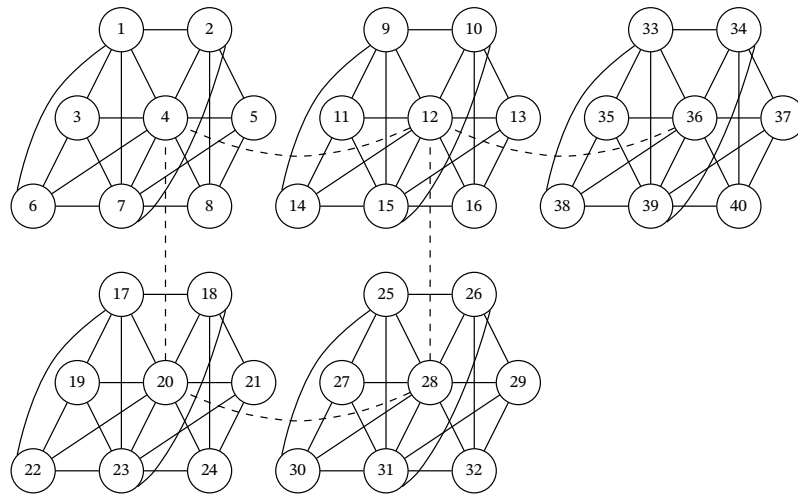


Рис. 22: Масштабування топології «Решітка», крок 5

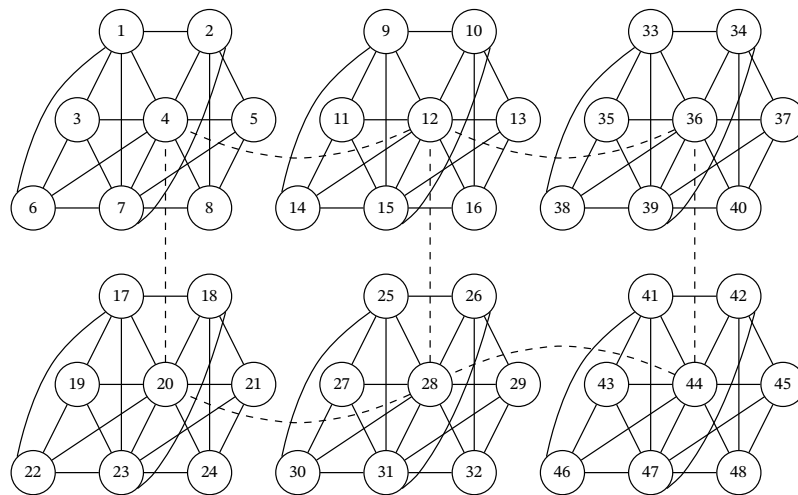


Рис. 23: Масштабування топології «Решітка», крок 6

3.2. Визначення кількості процесорів, які додаються на кожному кроці масштабування

Визначаємо кількість процесорів, які додаються на кожному кроці масштабування. За граф-схемою кластера з пронумерованими процесорами видно, що кластер містить 8 процесорів, отже, на кожному кроці масштабування при підключенні нового кластеру кількість процесорів системи збільшуватиметься на 8.

Завдання курсового проекту передбачає, що треба масштабувати систему, поки кількість процесорів у системі не стане більшою за 100. Визначимо кінцеву кількість процесорів n_f . Нехай n_c — кількість процесорів у кластері, а n_t — цільова кількість процесорів. Тоді кінцева кількість процесорів n_f обчислюється так:

$$n_f = \left\lceil \frac{n_t}{n_c} \right\rceil \cdot n_c = \left\lceil \frac{100}{8} \right\rceil \cdot 8 = 13 \cdot 8 = 104,$$

де $\lceil x \rceil$ — функція округлення до більшого значення.

Отже, початкова кількість процесорів у топології $n_c = 8$, остаточна кількість після останнього кроку масштабування $n_f = 104$. Визначивши кількості процесорів, що додаються на кожному кроці, а також остаточну кількість процесорів, переходимо до масштабування топологій.

3.3. Опис внутрішньо- та міжкластерних зв'язків при масштабуванні

При масштабуванні внутрішньокластерні зв'язки не змінюються, оскільки при масштабуванні топологій кластери під'єднуються до заданих процесорів, тобто створюється тільки новий міжкластерний зв'язок. Опис міжкластерних зв'язків при масштабуванні наведений відповідно для кожної топології (пп. 3.1).

3.4. Обчислення топологічних характеристик

Промасштабувавши топології «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка», обчислюємо їх топологічні характеристики для кожного кроку масштабування. До досліджуваних топологічних характеристик належать: діаметр D , середній діаметр \bar{D} , степінь S , вартість C і трафік T . Заносимо отримані значення у таблиці: для топології «Лінійка» — табл. 1, для топології «Зірка» — табл. 2, для топології «Кільце» — табл. 3, для топології «Решітка» — табл. 4.

Табл. 1: Залежність топологічних характеристик від кількості процесорів під час масштабування топологією «Лінійка»

К-кість проц. n	Топологічні характеристики				
	Діаметр D	Середній діаметр \bar{D}	Степінь S	Вартість C	Трафік T
8	2	1,286	7	20	0,367
16	3	2,067	8	41	0,517
24	4	2,536	9	62	0,564
32	5	2,935	9	83	0,652
40	6	3,308	9	104	0,735
48	7	3,667	9	125	0,815
56	8	4,018	9	146	0,893
64	9	4,365	9	167	0,970
72	10	4,709	9	188	1,046
80	11	5,051	9	209	1,122
88	12	5,391	9	230	1,198
96	13	5,730	9	251	1,273
104	14	6,068	9	272	1,348

Табл. 2: Залежність топологічних характеристик від кількості процесорів під час масштабування топологією «Зірка»

К-кість проц. n	Топологічні характеристики				
	Діаметр D	Середній діаметр \bar{D}	Степінь S	Вартість C	Трафік T
8	2	1,286	7	20	0,367
16	3	2,067	8	41	0,517
24	4	2,536	9	62	0,564
32	4	2,806	10	83	0,561
40	4	2,979	11	104	0,542
48	4	3,099	12	125	0,517
56	4	3,187	13	146	0,490
64	4	3,254	14	167	0,465
72	4	3,307	15	188	0,441
80	4	3,349	16	209	0,419
88	4	3,385	17	230	0,398
96	4	3,414	18	251	0,379
104	4	3,439	19	272	0,362

Табл. 3: Залежність топологічних характеристик від кількості процесорів під час масштабування топологією «Кільце»

К-кість проц. n	Топологічні характеристики				
	Діаметр D	Середній діаметр \bar{D}	Степінь S	Вартість C	Трафік T
8	2	1,286	7	20	0,367
16	3	2,067	8	41	0,517
24	3	2,304	9	63	0,512
32	4	2,677	9	84	0,595
40	4	2,897	9	105	0,644
48	5	3,213	9	126	0,714
56	5	3,436	9	147	0,764
64	6	3,730	9	168	0,829
72	6	3,958	9	189	0,879
80	7	4,241	9	210	0,942
88	7	4,471	9	231	0,994
96	8	4,747	9	252	1,055
104	8	4,981	9	273	1,107

Табл. 4: Залежність топологічних характеристик від кількості процесорів під час масштабування топологією «Решітка»

К-кість проц. n	Топологічні характеристики				
	Діаметр D	Середній діаметр \bar{D}	Степінь S	Вартість C	Трафік T
8	2	1,286	7	20	0,367
16	3	2,067	8	41	0,517
24	4	2,536	9	62	0,564
32	4	2,677	9	84	0,595
40	5	2,979	10	105	0,596
48	5	3,099	10	127	0,620
56	6	3,353	10	148	0,671
64	6	3,413	11	170	0,620
72	6	3,507	11	192	0,638
80	7	3,714	11	213	0,675
88	7	3,786	11	235	0,688
96	7	3,877	11	257	0,705
104	8	4,060	11	278	0,738

3.5. Побудова графіків

Обчисливши топологічні характеристики при масштабуванні кожної топології, побудуємо графіки залежності кожної топологічної характеристики для усіх топологій, а саме: діаметр D (рис. 24), середній діаметр \bar{D} (рис. 25), степінь S (рис. 26), вартість C (рис. 27) і трафік T (рис. 28).

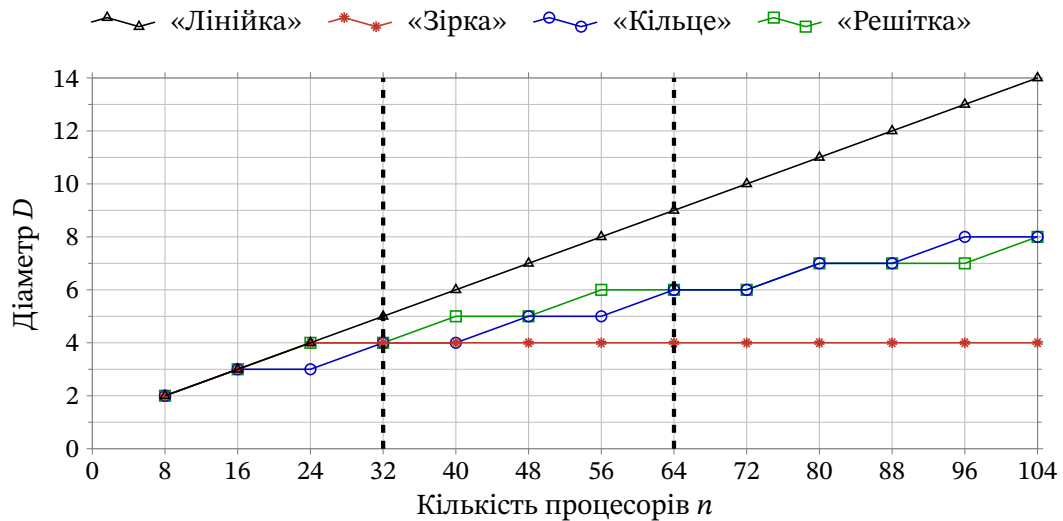


Рис. 24: Графік залежності діаметра D для топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка»

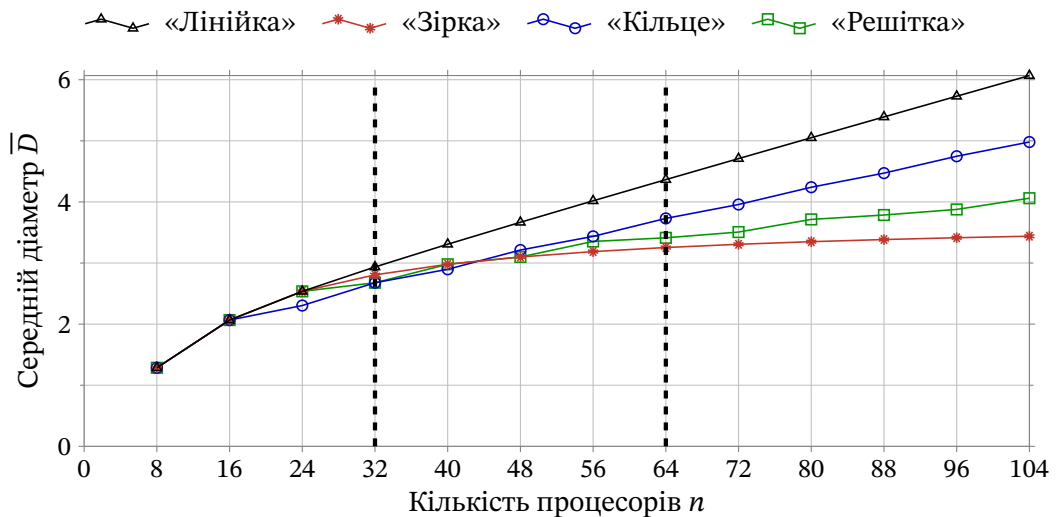


Рис. 25: Графік залежності середнього діаметра \bar{D} для топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка»

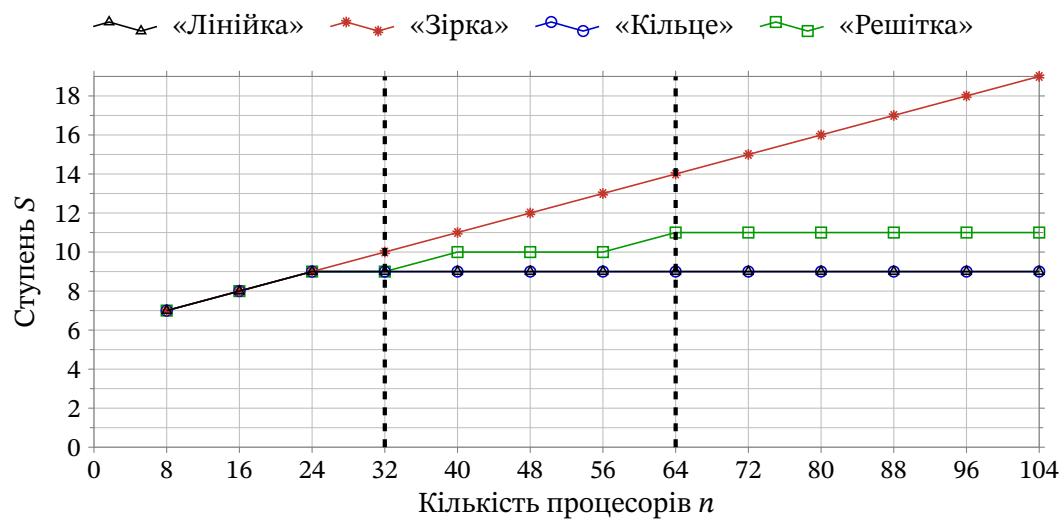


Рис. 26: Графік залежності ступеня S для топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка»

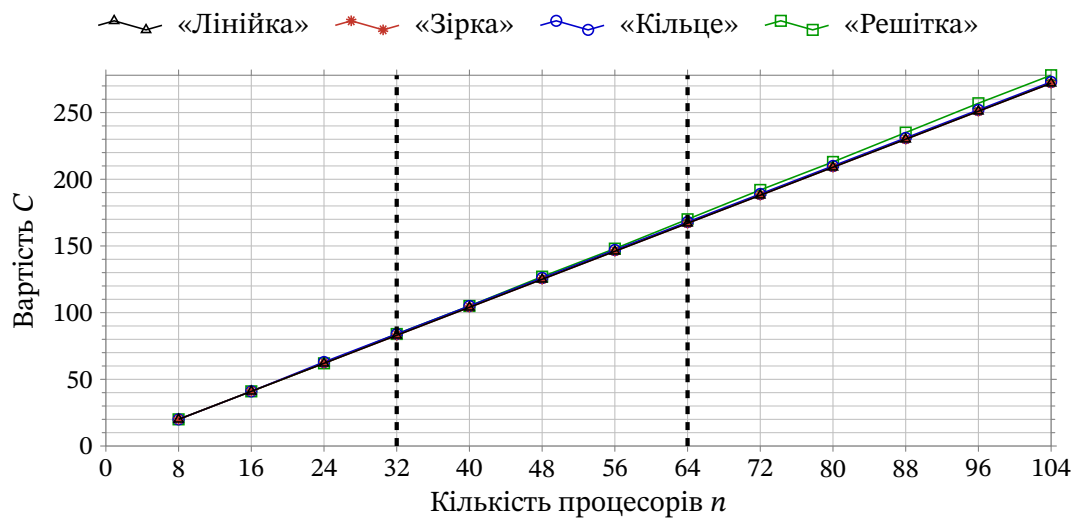


Рис. 27: Графік залежності вартості C для топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка»

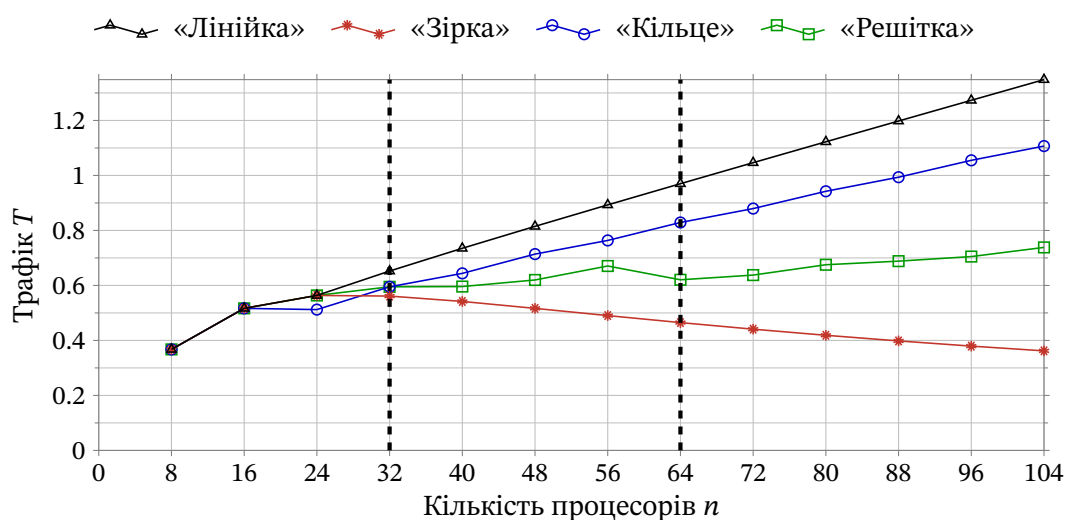


Рис. 28: Графік залежності трафіка T для топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка»

3.6. Порівняльний аналіз

Побудувавши графіки залежностей топологічних характеристик від кількості процесорів для кожної топології, порівнюємо значення цих характеристик. Для цього розділимо графіки на 3 зони. Границі зон визначаються там, де є найбільше точок перетину графіків залежності діаметру D від кількості процесорів. Тому отримаємо зони з такими границями:

1. Від 1 до 32 процесорів.
2. Від 33 до 64 процесорів.
3. Від 65 до 104 процесорів.

Обчислимо середні значення топологічних характеристик для кожної із зон і занесемо отримані результати у таблиці, відповідні кожній зоні (зона 1 — табл. 5, зона 2 — табл. 6, зона 3 — табл. 7).

Табл. 5: Середні значення топологічних характеристик топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка» для зони 1 (кількість процесорів n від 1 до 32)

Топологія	Діаметр D	Сер. діам. \bar{D}	Степінь S	Вартість C	Трафік T
Лінійка	3,50	2,206	8,25	51,50	0,525
Зірка	3,25	2,174	8,50	51,50	0,502
Кільце	3	2,084	8,25	52	0,498
Решітка	3,25	2,142	8,60	51,75	0,511

Табл. 6: Середні значення топологічних характеристик топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка» для зони 2 (кількість процесорів n від 33 до 64)

Топологія	Діаметр D	Сер. діам. \bar{D}	Степінь S	Вартість C	Трафік T
Лінійка	7,50	3,839	9	135,50	0,853
Зірка	4	3,130	12,50	135,50	0,503
Кільце	5	3,319	9	136,50	0,738
Решітка	5,50	3,211	10,25	137,50	0,627

Табл. 7: Середні значення топологічних характеристик топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка» для зони 3 (кількість процесорів n від 65 до 104)

Топологія	Діаметр D	Сер. діам. \bar{D}	Степінь S	Вартість C	Трафік T
Лінійка	12	5,390	9	230	1,198
Зірка	4	3,379	17	230	0,400
Кільце	7,20	4,479	9	231	0,995
Решітка	7	3,789	11	235	0,689

Оцінимо отримані середні значення топологічної характеристики за шкалою від 1 до 5 балів. Пам'ятаємо, що для діаметру D , середнього діаметру \bar{D} , ступеня S і вартості C оптимальним є найменше значення. Оптимальне значення трафіку $T = 1$.

Для оцінки характеристик використовуємо таку послідовність дій:

1. Знаходимо мінімальне і максимальне значення даної характеристики в усіх зонах: c_{\min} і c_{\max} .
2. Знаходимо крок інтервалу оцінки s : різницю максимального і мінімального значення: $s = c_{\max} - c_{\min}$.
3. Знаходимо інтервали для відповідних оцінок. Якщо оптимальне значення характеристики найменше, ліва границя інтервалу для найвищої оцінки b_l — мінімальне значення характеристики в усіх зонах: $b_l = c_{\min}$. Тоді права границя b_r буде сумою лівої границі і кроку інтервалу оцінки: $b_l + s$. Наприклад, якщо оптимальним є найменше значення, то для найвищої оцінки «5» отримуємо такий інтервал: $i_5 = [c_{\min}; c_{\min} + s)$. Повторюємо для всіх оцінок.
4. Визначивши інтервали, в залежності від того, в який з інтервалів попадає значення характеристики, присвоюємо йому відповідну оцінку і записуємо її в таблицю.

Результати оцінки заносимо у відповідні зони таблиці (зона 1 — табл. 8, зона 3 — табл. 9, зона 3 — табл. 10).

Табл. 8: Оцінки значень топологічних характеристик топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка» для зони 1 (кількість процесорів n від 1 до 32)

Топологія	Діаметр D	Сер. діаметр \bar{D}	Степінь S	Вартість C	Трафік T
Лінійка	5	5	5	5	1
Зірка	5	5	5	5	1
Кільце	5	5	5	5	1
Решітка	5	5	5	5	1

Табл. 9: Оцінки значень топологічних характеристик топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка» для зони 2 (кількість процесорів n від 33 до 64)

Топологія	Діаметр D	Сер. діаметр \bar{D}	Степінь S	Вартість C	Трафік T
Лінійка	3	3	5	3	4
Зірка	5	4	3	3	1
Кільце	4	4	5	3	3
Решітка	4	4	4	3	2

Табл. 10: Оцінки значень топологічних характеристик топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка» для зони 3 (кількість процесорів n від 65 до 104)

Топологія	Діаметр D	Сер. діаметр \bar{D}	Степінь S	Вартість C	Трафік T
Лінійка	1	1	5	1	4
Зірка	5	3	1	1	1
Кільце	3	2	5	1	5
Решітка	3	3	4	1	3

За побудованими таблицями оцінок для кожної з зон складаємо таблицю сумарних оцінок за зонами та підсумкових оцінок для топології (табл. 11).

Табл. 11: Сумарні оцінки значень топологічних характеристик топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка»

Топологія	Оцінка для різних зон			Сумарна оцінка
	Зона 1: $n \in [1; 32]$	Зона 2: $n \in [33; 64]$	Зона 3: $n \in [65; 104]$	
Лінійка	21	18	12	51
Зірка	21	16	11	48
Кільце	21	19	16	56
Решітка	21	17	14	52

Отже, отримали порівняльну оцінку топологій «Лінійка», «Зірка», «Кільце» і «Решітка» для масштабування паралельної системи на основі заданого кластера.

4. ВИСНОВОК

Виконуючи даний курсовий проект, були досліджені основні топологічні характеристики паралельних обчислювальних систем з масивно-паралельними архітектурами зі статичними зв'язками між процесорами. Характеристики розглядались на прикладі систем, організованих із заданих обчислювальних кластерів, з різними топологіями: «Лінійка», «Зірка», «Кільце», «Решітка».

Дослідження показало, що при невеликій кількості процесорів (від 1 до 32) досліджувані топології поведуться майже однаково: різниця у топологічних характеристиках незначна. Також виявлено, що вартість для різних топологій незмінно зростає за лінійним законом, так як нові кластери лише додаються, і тому кількість зв'язків у системі пропорційно збільшується.

Зі збільшенням кількості процесорів у системі топології поведуть себе по-різному. Наприклад, у топології «Лінійка» лінійно зростають діаметр, середній діаметр і трафік, тобто значення цих характеристик погіршуються і швидко виходять за межі бажаних.

При масштабуванні топології «Зірка» діаметр перестає зростати вже на 4 кроці, при 32 процесорах. Водночас стрімко зростає степінь системи. Фактично, топологія «Зірка» позбавляється лінійного зростання діаметра і середнього діаметра ціною такого ж стрімкого зростання степеня. На відміну від «Лінійки», де зі збільшенням кількості процесорів значення трафіка лінійно зростає, в топології «Зірка» його значення так само лінійно спадає, тим самим відхиляючись від оптимального значення $T = 1$. Тому з точки зору поведінки діаметра, середнього діаметра і трафіка топології «Лінійка» і «Зірка» є протилежними.

Плавне зростання діаметра, середнього діаметра і степеня на прикладі даного кластера спостерігається при масштабуванні топологій «Кільце» і «Решітка», однак, від середини масштабування (кількість процесорів $n > 32$) і аж до кінцевого кроку топологія «Кільце» мала кращі значення вищезгаданих параметрів, ніж «Решітка»: значення трафіка наближалась до оптимального, поки відхилення від оптимального значення для «Решітки» було вдвічі більшим. Тому можна сказати, що для масштабування даного конкретного кластеру до першого кроку, на якому кількість процесорів перевищить 100, є топологія «Кільце».

Загалом, судячи з результатів дослідження, проведеного в рамках даного курсового проекту, зрозуміло, що системи «Лінійка» і «Зірка» недоцільні для паралельних систем з масивно-паралельними архітектурами великих масштабів, в той час як «Кільце» і «Решітка» будуть оптимальними для таких задач, адже їх характеристики значно повільніше відхиляються від відповідних оптимальних значень. Зі збільшенням кількості процесорів найкращі характеристики матиме «Решітка», оскільки графіки показують, що значення її топологічних характеристик ростуть повільніше, а отже й менше відхиляються від бажаних, ніж аналогічні значення для топології «Кільце».

5. СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Богданов А. В., Корхов В. В., Мареев В. В., Станкова Е. Н. Архитектуры и топологии многопроцессорныхх вычислительных систем. Интернет-университет информационных технологий — ИНТУИТ.ру, 2004.
2. Бройдо В. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. — СПб.: Питер, 2002. — 688 с.
3. Головкин Б. А. Вычислительные системы с большим числом процессоров. — М.: Радио и связь, 1995. — 320 с.
4. Коуги П. М. Архитектура конвейерных ЭОМ: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1985.
5. Обчислювальні системи: Лабораторні роботи 1–4 / Уклад.: І. А. Жуков, Є. В. Красовська. — К.: НАУ, 2003. — 34 с.
6. Обчислювальні системи: Лабораторні роботи 5, 6 / Уклад.: І. А. Жуков, Є. В. Красовська, О. В. Русанова. — К.: НАУ, 2005. — 16 с.
7. Обчислювальні системи: Лабораторні роботи 7, 8 / Уклад.: І. А. Жуков, Є. В. Красовська, О. В. Русанова. — К.: НАУ, 2007. — 28 с.
8. Основы теории вычислительных систем: Учебное пособие / Под ред. С. А. Майорова. — М.: Высш. шк., 1978. — 260 с.
9. Самофалов К. Г., Луцкий Г. М. Основы теории многоуровневых конвейерных вычислительных систем. — М.: Радио и связь, 1989. — 272 с.
10. Цилькер Б. Я., Орлов С. А. Организация ЭВМ и систем: Учебник для вузов. — СПб.: Питер, 2006. — 668 с.