

УДК 004.031

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-1(23)-69-80

Артем Волокита, Володимир Русінов, Кирил Мугуєв

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ ДЛЯ ТОПОЛОГІЇ ДЕ БРУЙНА НА ОСНОВІ КОЕФІЦІЄНТА ПОСЕРЕДНИЦТВА

У статті розглянуто спосіб аналізу потенційних вразливих місць топологій при проектуванні відмовостійких систем на основі використання коефіцієнта посередництва. Розглянуто характеристики різних топологічних організацій на основі кодових перетворень Де Бруїна. Запропонований підхід, за рахунок оцінки ризиків відмов, може використовуватись для інших топологічних організацій з метою дослідження їх на відмовостійкість та з метою передбачення наслідків при одночасній відмові значних фрагментів топологій.

Ключові слова: граф де Бруїна; посередництво; відмовостійкість.

Рис.: 9. Табл.: 12. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. На сьогодні не існує універсального методу запобігання відмовам, тому приділяється додаткова увага створенню топологічних організацій з урахуванням відмовостійкості. Хоча такі методи існують та широко використовуються, рідше визначаються характеристики таких систем при відмовах деяких вузлів на вразливих ділянках. Запропонований метод дозволяє виокремити вузли, які мають найбільший вплив на характеристики системи. Ці вузли знаходяться під більшою загрозою, оскільки при атаках і виході з ладу, це призведе до швидкої деградації топології [1].

Постановка проблеми. Під час тривалої роботи високопродуктивної обчислювальної системи, деякі вузли починають відмовляти. Відмови в системі можуть призвести до непередбачуваних наслідків, якщо не було попередньо досліджено топологію системи. З іншого боку, повністю дослідити систему, враховуючи всі можливі комбінації відмов, на її характеристики дуже складно і займає досить довгий час, особливо якщо система використовує новітні рішення в ролі закладеної топології, а використання мережевих протоколів, які динамічно досліджують топологію системи, є досить затратним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Топологія – це одна з важливих складових проектування корпоративної комп'ютерної розподіленої системи, яка буде безпосередньо впливати на майбутню роботу всієї фінансової комп'ютерної системи організації. Тому питання відмовостійкості безпосередньо впливає на стабільність роботи всіх систем, у тому числі й системи управління фінансовою стійкістю підприємства з метою поліпшення його фінансового стану.

Сучасні суперкомп'ютери побудовані на основі різних топологій, таких як Dragonfly, Jellyfish та 6D-Torus. Dragonfly використовує підхід, який скорочує кількість кабелів для з'єднання кластерів, використовуючи спеціалізовані адаптивні маршрутизатори для розвантаження мережі [2]. Топологія Jellyfish має на меті розробку мережі з високою пропускнуною можливістю та горизонтальним масштабуванням, на основі базової топології випадкового графа. Така топологія проявила себе як більш придатна для дата-центрів, аніж топологія «товсте дерево» [3]. Найбільш швидкий сучасний суперкомп'ютер Fugaku використовує топологію 6DTor, яка дозволяє отримати більше паралельних маршрутів, що є важливим для забезпечення відмовостійкості обчислень [4; 5].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Топології на основі дебруїнівських зсувів раніше не досліджувались на їх відмовостійкість. Запропонований метод є відносно новим та пропонує замість вирішення задачі пошуку випадкового вузла, який може відмовити, змодельовати ситуацію атаки на систему, де під найбільшим ризиком знаходяться саме вузли посередники [1], які концентрують потоки даних між вузлами у високопродуктивних системах. Використовуючи алгоритм пошуку найкоротшого шляху Флойда-Воршелла, можна встановити, які саме вузли є посередниками.

Мета статті. Метою дослідження є розробка способу підвищення відмовостійкості топологічних організацій на основі використання коефіцієнта посередництва для пошуку найбільш вразливих вузлів в системі та дослідження впливу відмов таких вузлів на топологічні характеристики системи.

Виклад основного матеріалу. Розробка топологічної організації потребує дослідження її на відмовостійкість. Відмовостійкість враховує можливість відмови того чи іншого вузла, при цьому система загалом залишається працездатною, хоча і матиме дещо гірші показники. На відміну від мереж, розроблених на локальному рівні, наприклад домашня, офісна або університетська, високопродуктивні комп'ютерні системи мають досить складну структуру, та є сенс дослідити аналітично цю структуру перед її реалізацією. Розробка комп'ютерної системи, яка дозволяє організації підтримувати власні операційні процеси у стабільному стані навіть за умови понаднормової кількості відмов, є запорукою забезпечення існування організації в довгостроковій перспективі [6].

Для дослідження топології необхідно обрахувати її показники. До основних показників топологій будемо відносити кількість N вузлів топології, ступінь топології, діаметр топології, середній діаметр топології, топологічний трафік, вартість, а також мультиплікативний параметр SD . Характеристики топології розраховували за такими формулами:

Діаметр систем (D) – це мінімальна відстань між двома максимально віддаленими процесорами.

Середній діаметр визначає середню відстань до будь-якого вузла та описується згідно з формулою:

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

Ступінь (S) – характеристика визначається як максимальне число дуг (зв'язків) інцидентних вершині (процесору) у графі топології системи.

Вартість визначається за допомогою формули:

$$C = D \cdot n \cdot S.$$

Топологічний трафік описує ефективність використання зв'язків у системі й визначається згідно з формулою:

$$T = \frac{2\bar{D}}{S}.$$

Мультиплікативний параметр SD визначається за допомогою формули:

$$SD = S \cdot D.$$

Для оцінки відмовостійкості досліджуваної топології, введемо поняття коефіцієнт посередництва. Цей коефіцієнт вказує на кількість найкоротших шляхів між деякими двома вузлами в мережі. Теоретично, якщо відмовляє вузол, або декілька вузлів, з високим коефіцієнтом посередництва, алгоритм пошуку нового шляху має перерахувати новий найкоротший шлях, причому відстань цього шляху може бути вищою. Вузли з найбільшим показником коефіцієнта посередництва мають більш важливу роль у формуванні зв'язків з іншими вузлами в системі. Формула обрахунку коефіцієнта посередництва така [1]:

$$b_m = \sum_{i \neq j} \frac{B(i,m,j)}{B(i,j)},$$

де $B(i, j)$ – загальна кількість найкоротших шляхів між вузлами i та j і $B(i, m, j)$ – кількість найкоротших шляхів між i, j що проходить через вузол m . Враховуючи, що найкоротші маршрути можуть бути невідомими і в мережі використовується пошуковий алгоритм, тоді посередництво вузла може виражатись ймовірністю його знаходження за цим алгоритмом. Для цього вводиться поняття коефіцієнта переважання найбільшого посередника, який обчислюється згідно формули:

$$CPD = \frac{1}{n-1} \sum_i (B_{max} - B_i),$$

де B_{max} – найбільше значення коефіцієнта переважання найбільшого посередника [1].

Для пошуку шляху обрано алгоритм Флойда-Воршелла модифікований для запам'ятовування шляху між вершинами. Алгоритм Флойда-Воршелла порівнює всі можливі шляхи в графі між кожною парою вершин. Для деякого графу $G(V, E)$ конструюємо матрицю відстаней, ставимо відстань усіх вершин до самих себе як 0. Шукаємо відстань від однієї вершини до іншої, та в окремій матриці відмічаємо вузол задіяний у пошуку найкоротшого шляху. Таким чином, на виході буде дві матриці: матриця відстаней між вершинами та матриця посередництва. Для розглянутих топологій на другому кроці масштабування, вершини-посередники помічені зеленим кольором [7].

Синтез топології здійснюється за допомогою дебруйнівських зсувів, але дещо інакше реалізовані. Було встановлено, що топологія, отримана на зсувах де Бруйна з використанням надлишкового коду, має кращі характеристики та кращу відмовостійкість. Використовуючи цей підхід, можна розробити топологічну організацію, на основі двійкової, трійкової та кварternарної системи числення та додаткового коду.

Перший варіант – двійковий надлишковий Де Бруйн. При формуванні нової послідовності, старша цифра витискається (зникає), молодша цифра після зсуву отримує значення 0,1 або T, яке має значення -1. Отримані таким чином вузли мають зв'язок з вузлом, від номера якого зроблено зсув. Як приклад візьмемо наступну таблицю формування послідовності де Бруйна для тризначних чисел [8; 9].

На рис. 1-3 зображені топологічні організації для різних систем зчислення. Для наглядності вузли 0-кластера продубльовано на рисунках. Таке графічне дублювання дозволяє більш наглядно показати принцип міжкластерності. Також зазначимо, що отримані топології не використовують приховані «квантові» зв'язки [10]. Тому запропоновані графи можна розглядати, як класичні графи де Бруйна в різних системах зчислення.

У табл. 1 показано формування зв'язків між вузлами топології. Зв'язки отримуємо за допомогою зсуву вліво. Місце молодшого біта займає новий біт із трьома значеннями: 0,1,T.

Таблиця 1. Таблиця формування дебруйнівських послідовностей

Номер вузла	00			01			0T		
Зв'язки	00	01	0T	10	11	1T	T0	T1	TT
Номер вузла	10			11			1T		
Зв'язки	00	01	0T	10	11	1T	T0	T1	TT
Номер вузла	T0			T1			TT		
Зв'язки	00	01	0T	10	11	1T	T0	T1	TT

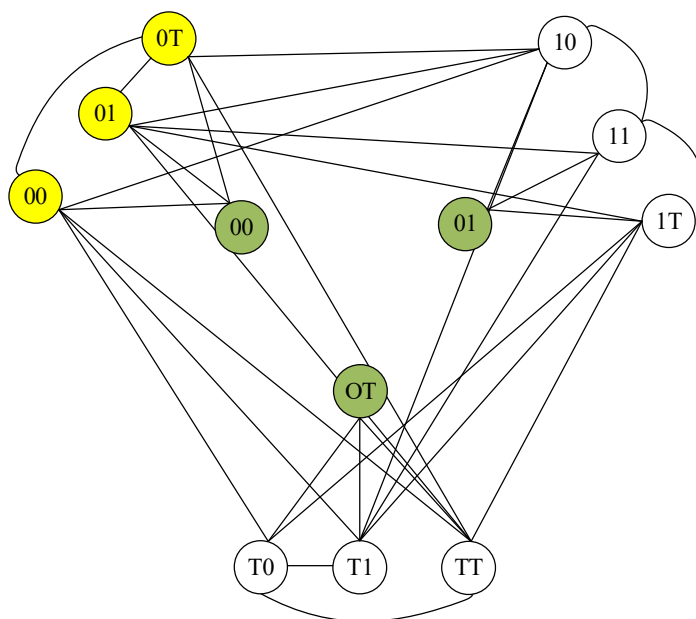


Рис. 1. Кластер для двійкової надлишкової системи 01T. Топологія А

На рис. 1 зображено топологію з 9 вершинами. Вузли виділені зеленим кольором (00, 01, 0T) схематично продубльовано, тому в моделюванні обчислюється характеристики топологій без врахування «зелених» вузлів, а лише з «жовтими» вузлами.

Таблиця 2. Таблиця топологічних характеристик топології А на перших 5 кроках масштабування

К-сть вузлів	Діаметр	Ступінь	Середній діаметр	Ціна	Топологічний трафік	SD
3	1	3	1	9	0.67	3
9	2	5	1.41667	90	0.5667	10
27	3	6	2.07692	486	0.6923	18
81	4	6	2.83333	1944	0.9444	24
243	5	6	3.6738	7290	1.2246	30
729	6	6	4.57224	26244	1.52408	36
2187	7	6	5.50623	91854	1.83541	42

Як видно з табл. 2, топологічний трафік зростає майже лінійно, що дозволяє проектувати топології з прийнятним рівнем ступенів вузлів.

Таблиця 3. Таблиця вузлів зі значенням коефіцієнта посередництва

Код вузла	Номер вузла	Кількість найкоротших шляхів через вузол	Коефіцієнт посередництва
0T	-1	10	0.2778
00	1	4	0.1111
01	0	10	0.2778
1T	1	10	0.2778
10	2	10	0.2778
11	3	4	0.1111
TT	-3	4	0.1111
T0	-2	10	0.2778
T1	-1	10	0.2778

У табл. 3 показано кількість найкоротших шляхів через кожен вузол топології, а також коефіцієнт посередництва для відповідного вузла. Таким чином, ми можемо виділити вузли, через які проходить найбільша кількість маршрутів. Тому потенційно ці вузли повинні бути більш захищеними, можливо з використанням механізмів резервування.

Другий варіант топології використовує трійкову систему числення та надлишковий код. В основі закладено наступні числа: 0, 1, 2, T, Z, де T – має значення -1 та Z має значення -2. Таких зсувів достатньо багато, тому є сенс надати лише фрагмент таблиці, для ознайомлення з принципом.

Таблиця 4. Фрагмент таблиця формування дебруїнівських послідовностей

Номер вузла	00					01					0T				
Зв'язки	00	01	02	0T	0Z	10	11	12	1T	1Z	T0	T1	T2	TT	TZ
Номер вузла	10					11					1T				
Зв'язки	00	01	02	0T	0Z	10	11	12	1T	1Z	T0	T1	T2	TT	TZ
Номер вузла	T0					T1					TT				
Зв'язки	00	01	02	0T	0Z	10	11	12	1T	1Z	T0	T1	T2	TT	TZ

У табл. 4 показано формування зв'язків між вузлами топології. Зв'язки отримуємо за допомогою зсуву вліво. Місце молодшого біту займає новий біт з трьома значеннями: 0,1,2,T,Z.

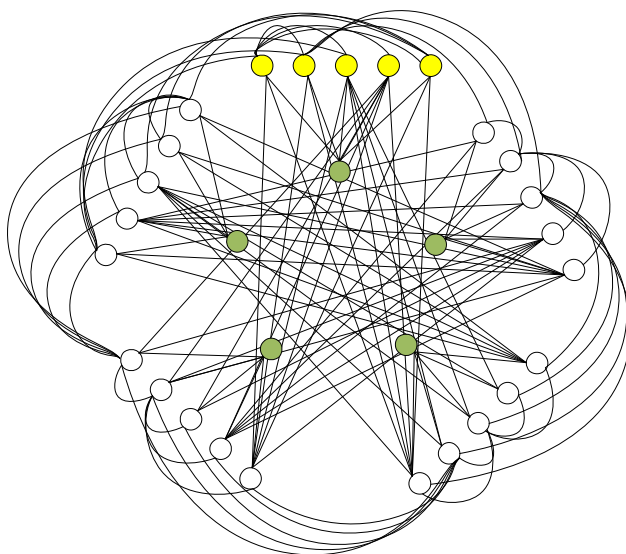


Рис. 2. Кластер для трійкової надлишкової системи 012TZ. Топологія B

На рис. 2 зображено топологію з 25 вершинами. Вузли виділені зеленим кольором (00, 01, 02, 0T, 0Z) схематично продубльовано, тому в моделюванні обчислюється характеристики топологій без врахування «зелених» вузлів, а лише з «жовтими» вузлами.

Таблиця 5. Таблиця топологічних характеристик топології B на перших 5 кроках масштабування

К-сть вузлів	Діаметр	Ступінь	Середній діаметр	Ціна	Топологічний графік	SD
5	1	5	1.0	25	0.4	5
25	2	9	1.63333	450	0.36296	18
125	3	10	2.47097	3750	0.49419	30
625	4	10	3.37795	25000	0.67559	40
3125	5	10	4.33399	156250	0.8668	50

Як видно з табл. 5, топологічний трафік аналогічно як в топології А топологічний трафік зростає лінійно, але починаючи з меншого значення. Також ступінь топології В – 10 в порівнянні з топологією А – 6.

Таблиця 6. Таблиця вузлів зі значенням коефіцієнта посередництва

Код вузла	Номер вузла	Кількість найкоротших шляхів через вузол	Коефіцієнт посередництва
0Z	-2	50	0.1667
0T	-1	50	0.1667
00	0	24	0.08
01	1	50	0.1667
02	2	50	0.1667
1Z	0	50	0.1667
1T	1	50	0.1667
10	3	50	0.1667
11	4	24	0.08
12	5	50	0.1667
2Z	4	50	0.1667
2T	5	50	0.1667
20	6	50	0.1667
21	7	50	0.1667
22	8	24	0.08
TZ	-5	50	0.1667
TT	-4	24	0.08
T0	-3	50	0.1667
T1	-2	50	0.1667
T2	-1	50	0.1667
ZZ	-8	24	0.08
ZT	-7	50	0.1667
Z0	-6	50	0.1667
Z1	-5	50	0.1667
Z2	-4	50	0.1667

У табл. 6, аналогічно до табл. 3, показано кількість найкоротших шляхів через кожен вузол топології, а також коефіцієнт посередництва для відповідного вузла. Видно, що з ростом кількості вершин у топології кількість найкоротших шляхів також збільшується, проте загальна кількість зростає швидше за квадратичною формулою.

Розглянемо останній варіант топології на основі кватернарної системи числення та дебруйнівських зсувів. Таким чином, під час зсуву числа, на останню позицію може бути записане числа 0,1,2,3,T,Z,E. T – має значення -1, Z – має значення -2, E – має значення -3.

Таблиця 7. Деякі коди вузлів при формування дебруйнівських послідовностей

Номер вузла	E0								ET					
	00	01	02	03	0T	0Z	0E	T0	T1	T2	T3	TT	TZ	TE
Зв'язки	00	01	02	03	0T	0Z	0E	T0	T1	T2	T3	TT	TZ	TE
Номер вузла	00								0T					
	00	01	02	03	0T	0Z	0E	T0	T1	T2	T3	TT	TZ	TE
Зв'язки	00	01	02	03	0T	0Z	0E	T0	T1	T2	T3	TT	TZ	TE
Номер вузла	20								2T					
	00	01	02	03	0T	0Z	0E	T0	T1	T2	T3	TT	TZ	TE
Зв'язки	00	01	02	03	0T	0Z	0E	T0	T1	T2	T3	TT	TZ	TE

У табл. 7 показано фрагмент побудови дебруйнівських послідовностей, тобто які зв'язки можна отримати для деяких тризначних чисел.

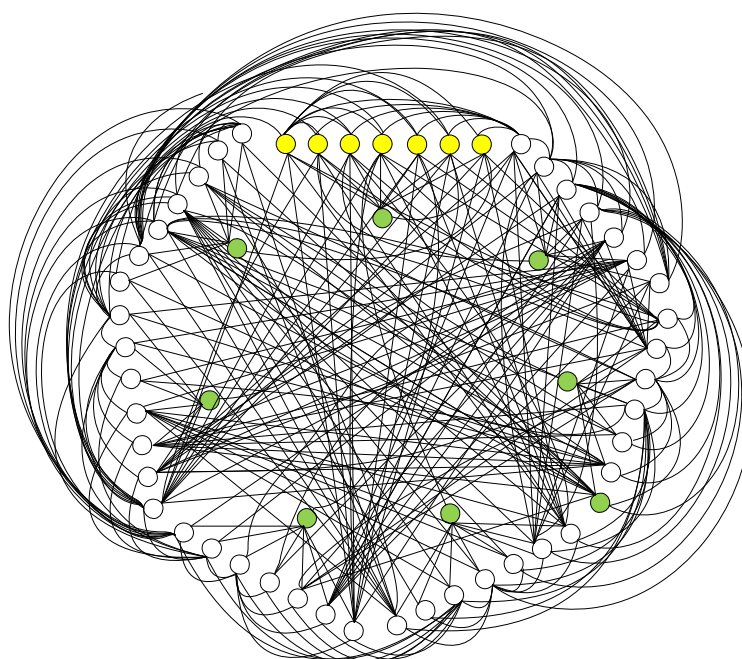


Рис. 3. Кластер для четвіркової надлишкової системи 0123TZE. Топологія С

На рис. 3 зображено топологію з 49 вершинами. Вузли виділені зеленим кольором (00, 01, 0Т, 02, 0Z, 03, 0E) схематично продубльовано, тому в моделюванні обчислюється характеристики топологій без врахування «зелених» вузлів, а лише з «жовтими» вузлами.

Таблиця 8. Таблиця топологічних характеристик топології С на перших 5 кроках масштабування

К-сть вузлів	Діаметр	Ступінь	Середній діаметр	Ціна	Топологічний графік	SD
7	1	7	1.00000	49	0.29	7
49	2	13	1.73214	1274	0.26648	26
343	3	14	2.63909	14406	0.37701	42
2401	4	14	3.59177	134456	0.51311	56
16807	5	14	4.57424	1176490	0.65346	70

З табл. 8, видно що остання топологія має схожі характеристики з першими двома топологіями, але ступінь вищий за топологію В на 4. У порівнянні з таблицями 2 і 5, використання більшої системи зчислення дозволяє розробити топологію з більшою кількістю вершин при однаковому діаметрі, проте жертвуючи ступіню.

Таблиця 9. Таблиця вузлів зі значенням коефіцієнта посередництва

Код вузла	Номер вузла	Кількість найкоротших шляхів через вузол	Коефіцієнт посередництва
1	2	3	4
0E	-3	122	0.1037
0Z	-2	122	0.1037
0T	-1	122	0.1037
00	0	60	0.0510
01	1	122	0.1037
02	2	122	0.1037
03	3	122	0.1037
1E	1	122	0.1037
1Z	2	122	0.1037

Закінчення табл. 9

1	2	3	4
1T	3	122	0.1037
10	4	122	0.1037
11	5	60	0.0510
12	6	122	0.1037
13	7	122	0.1037
2E	5	122	0.1037
2Z	6	122	0.1037
2T	7	122	0.1037
20	8	122	0.1037
21	9	122	0.1037
22	10	60	0.0510
23	11	122	0.1037
3E	9	122	0.1037
3Z	10	122	0.1037
3T	11	122	0.1037
30	12	122	0.1037
31	13	122	0.1037
32	14	122	0.1037
33	15	60	0.0510
TE	-7	122	0.1037
TZ	-6	122	0.1037
TT	-5	60	0.0510
T0	-4	122	0.1037
T1	-3	122	0.1037
T2	-2	122	0.1037
T3	-1	122	0.1037
ZE	-11	122	0.1037
ZZ	-10	60	0.0510
ZT	-9	122	0.1037
Z0	-8	122	0.1037
Z1	-7	122	0.1037
Z2	-6	122	0.1037
Z3	-5	122	0.1037
EE	-15	60	0.0510
EZ	-14	122	0.1037
ET	-13	122	0.1037
E0	-12	122	0.1037
E1	-11	122	0.1037
E2	-10	122	0.1037
E3	-9	122	0.1037

Тенденція, яку ми підкреслили в таблицях 3 і 6, зберігається і для останньої топологічної організації. Можна помітити, що використання надлишкових кодів створює умови, за яких кількість альтернативних найкоротших маршрутів однакова для більшості вузлів, що важливо при проектуванні відмовостійкої топологічної організації.

Результати. Робимо видалення вершин, симулюючи відмови вузлів у системі. Першими відмовляють вершини з найбільшим показником коефіцієнта посередництва і так поки не відмовить 10 % з усіх вузлів, які працюють у системі. У ролі досліджуваних топологій використані вищеописані топології, які використовують двійковий, трійковий та кватернарний надлишковий дебруйнівський код. У табл. 10-12 представлені значення характеристик для топологій без відмов, на точках де значно змінюються характеристики та з відмовою 10 % вузлів.

Таблиця 10. Характеристика топології А (01Т)
при зростанні кількості відмов вузлів-посередників

К-сть відмов	Діаметр	Ступінь	Середній діаметр	Ціна	Топологічний графік	SD
0	7	6	5.50623	91854	1.83541	42
15	8	6	5.5189	104256	1.83963	48
21	9	6	5.52433	116964	1.84144	54
92	10	6	5.61364	125700	1.87121	60
210	11	6	5.80115	130482	1.93372	66
219	11	6	5.8164	129888	1.9388	66

Таблиця 11. Характеристика топології В (ZT012A)
при зростанні кількості відмов вузлів-посередників

К-сть відмов	Діаметр	Ступінь	Середній діаметр	Ціна	Топологічний графік	SD
0	5	10	4.33399	156250	0.8668	50
13	6	10	4.33707	186720	0.86741	60
98	7	10	4.36586	211890	0.87317	70
183	8	10	4.39902	235360	0.8798	80
313	8	10	4.48885	224960	0.89777	80

Таблиця 12. Характеристика топології С (EZT0123)
при зростанні кількості відмов вузлів-посередників

К-сть відмов	Діаметр	Ступінь	Середній діаметр	Ціна	Топологічний графік	SD
0	4	14	3.59178	134456	0.51311	56
18	5	14	3.59189	166810	0.5136	70
82	6	14	3.59521	194796	0.51591	84
176	7	14	3.61135	218050	0.52322	98
295	7	14	3.66253	211680	0.52925	98

Відповідно до отриманих результатів, можна побачити, що для отримання значно гірших топологічних показників необхідно, щоб відмовило хоча б 7 вузлів, при цьому, якщо відмовляють наступні 8 вузлів, характеристики ще більше погіршуються. Отже, можна стверджувати, що пошук цих вузлів важливий для підтримання характеристик та продуктивності системи.

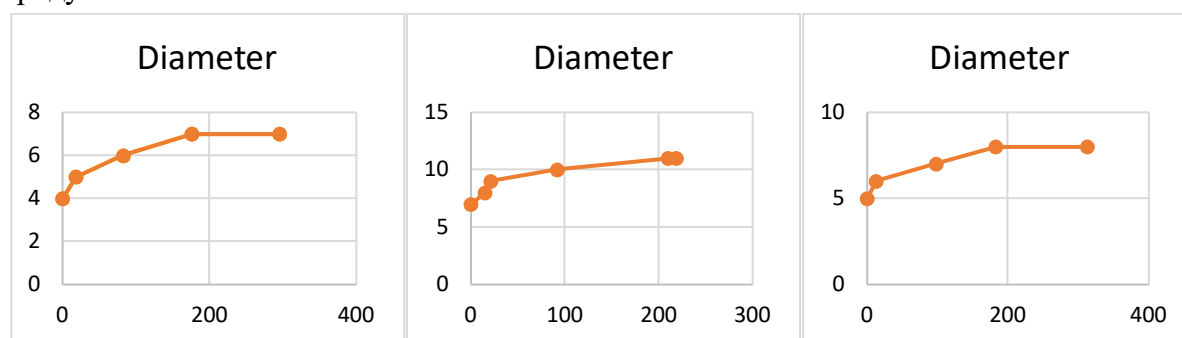


Рис. 4. Залежність діаметра від кількості атакованих вузлів. Топології А, В, С

Як видно з діаграм на рисунку, діаметри усіх топологій значно змінюються при відмові вузлів з найбільшими показниками коефіцієнта посередництва.

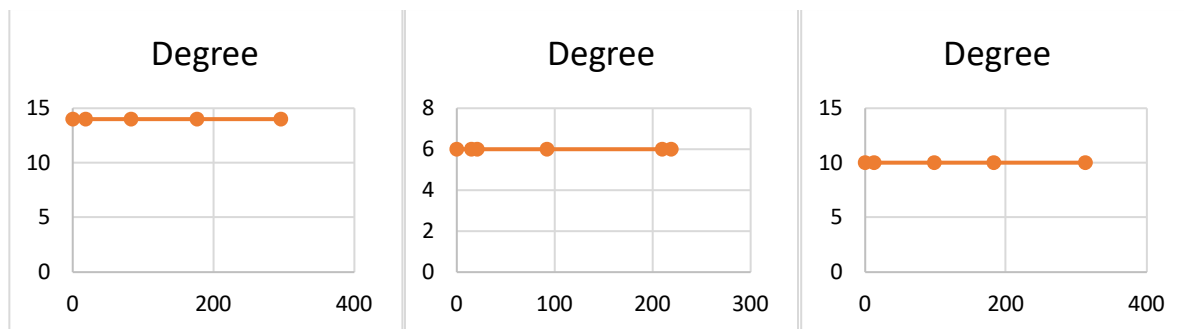


Рис. 5. Залежність ступеня від кількості атакованих вузлів. Топології А, В, С.

Проте потенційна відмова 10 % вузлів жодним чином не впливає на ступінь системи загалом.

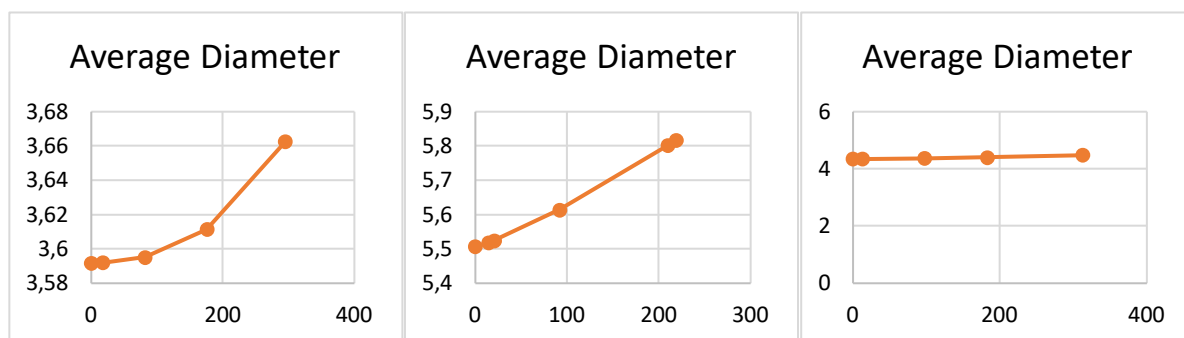


Рис. 6. Залежність середнього діаметра від кількості атакованих вузлів. Топології А, В, С

Середній діаметр збільшується на 2 % для першої топології, на 5,3 % для другої топології, на 3,6 % для третьої топології.

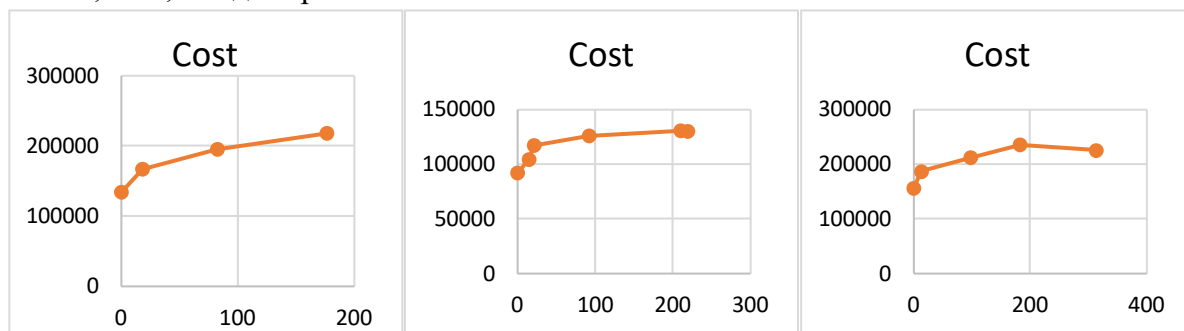


Рис. 7. Залежність ціни від кількості атакованих вузлів. Топології А, В, С

Ціна залежить від діаметру та кількості вершин, тому на графіках спостерігаються тенденції, схожі з графіками діаметра.

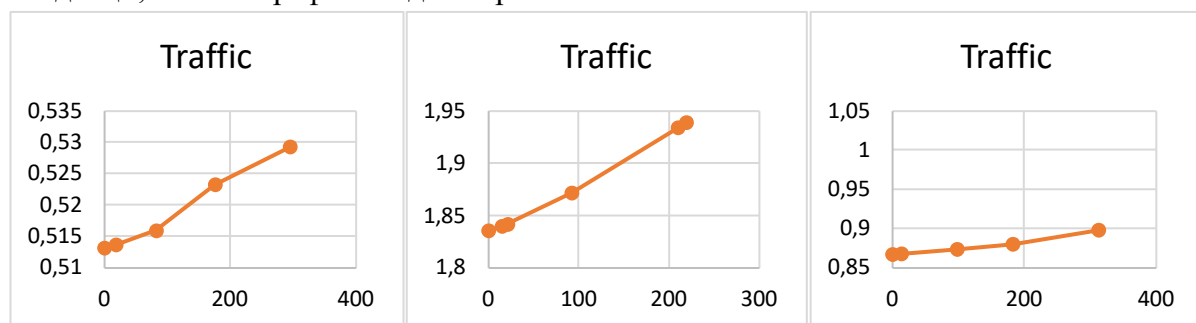


Рис. 8. Залежність топологічного трафіку від кількості атакованих вузлів. Топології А, В, С

Трафік для кожної топології зростає із відмовами вузлів із найбільшим коефіцієнтом посередництва. Для першої топології цей ріст становить 3 %, для другої 5,3 %, для третьої 3,5 %.

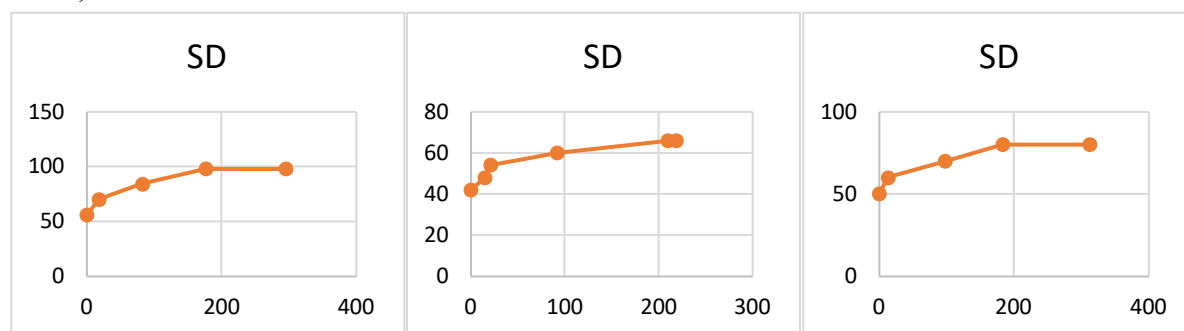


Рис. 9. Залежність мультиплікативного параметру SD від кількості атакованих вузлів. Топології A, B, C

Мультиплікативний параметр SD має такий же ріст, як і діаметр, оскільки на всій досліджуваній ділянці ступінь залишається сталою.

Висновки. Досліджувані топології були розроблені з урахуванням відмовостійкості, тому при проведенні експериментів, тому потрібно досить багато відмов в вузлах посередників, щоб значно погіршились характеристики. Незважаючи на атаку на 10 % вузлів з найвищими показниками посередництва в системі, показники топологічного трафіку та середнього діаметра залишались схожими до початкових. Але діаметр таких систем значно зростає, разом з ним і мультиплікативний параметр SD. Значний ріст діаметру призводить до більших затримок у мережі та до потреби в розробці програм з урахуванням більшої затримки. Тому можна зазначити, що запропонований метод пошуку вершин посередників виявився ефективним у пошуку вразливих вершин.

У ролі можливої модифікації є аналіз найкоротших шляхів для встановлення вузлів посередників у топологіях з прихованими зв'язками. Іншим напрямом може бути розробка топологічних організацій з урахуванням посередництва і використання додаткових вузлів на цих вразливих ділянках.

Список використаних джерел

1. Додонов А. Г., Ландэ Д. В. Живучесть информационных систем. Киев: Наук. думка, 2011. 256 с.
2. Kim J., Dally W. J., Scott S., & Abts D. Technology-driven, highly-scalable dragonfly topology. *In 2008 International Symposium on Computer Architecture. IEEE*. 2008, June. Pp. 77-88.
3. Singla A., Hong C. Y., Popa L., & Godfrey P. B. Jellyfish: Networking data centers randomly. *In Presented as part of the 9th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 12)*. 2012. Pp. 225-238.
4. The tofu interconnect D. / AJIMA, Yuichiro, et al. *In 2018 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER)*. IEEE 2018. Pp. 646-654.
5. Ajima Y., Inoue T., Hiramoto S., & Shimizu T. Tofu: Interconnect for the K computer. *Fujitsu Sci. Tech. J.* 2012. Vol. 48(3). Pp 280-285.
6. Партин Г. О., Дідух О. В. Особливості впливу основних чинників на фінансову стійкість підприємства в умовах фінансово-економічної кризи. *Збірник науково-технічних праць Національного лісотехнічного університету України*. 2010. № 10. С. 276-279.
7. HOUGARDY, Stefan. The Floyd–Warshall algorithm on graphs with negative cycles. *Information Processing Letters*. 2010. Vol. 110.8-9. Pp. 279-281.
8. Olexandr G., Rehida P., Volokyta A., Loutskii H., Think V.D. Routing Method Based on the Excess Code for Fault Tolerant Clusters with InfiniBand. *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 938. Springer, Cham.

9. Loutskii, H., Volokyta, A., Rehida, P., Goncharenko, O. Using excess code to design fault-tolerant topologies. *Technical sciences and technologies*. 2019. № 1(15). Pp. 134–144. DOI: [https://dx.doi.org/DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1\(15\)-134-144](https://dx.doi.org/DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-134-144).

10. Loutskii H., Volokyta A., Rehida P., Honcharenko O., Ivanishchev B., Kaplunov A. Increasing the fault tolerance of distributed systems for the Hyper de Bruijn topology with excess code. *2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*. Kyiv, 2019, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030487.

UDC 004.031

Artem Volokyta, Volodymyr Rusinov, Kyryl Muhuiev

FAULT TOLERANCE EXPLORATION FOR DE BRUIJN TOPOLOGY BASED ON BETWEENNESS COEFFICIENT

Today there is no universal method of fault prevention, therefore additional attention is devoted to creating topological organizations with fault tolerance in mind. Although such methods exist and are used widely, parameters of such systems are less often determined during faults of some nodes on vulnerable sites. This proposed method lets us outline nodes that have the most influence on the parameters of the system. These nodes are under greater threat because attacks and faults lead to faster degradation of topology.

During extended workloads of a highly productive computer system, some nodes begin to fault, which influences the efficiency of the system and its parameters unsuspectedly.

At this moment there is a set of articles devoted to the analysis of different topologies that are used in modern supercomputers, and there are also articles devoted to fault tolerance in such systems. Topologies, based on De Bruijn shifts, have not been researched for their fault tolerance by finding mediator nodes that concentrate flows of data between nodes.

The research task is to develop a method to increase the fault tolerance of topological organizations based on the use of betweenness coefficient to find the most vulnerable nodes in the system and research the influence of faults of such nodes on topological parameters of the system.

This article describes the synthesis of three topologies based on De Bruijn shifts and excessive codes and their usage in the context of financial security, and an algorithm for finding the shortest paths and system parameters change after faults of mediator nodes.

An analysis of the system parameters is performed for up to 10% of faults. Conclusions are drawn for the usage of this synthesized topologies in the context of changes in topological characteristics in case of failure of key nodes are made.

Keywords: *de Bruijn graph; betweenness; fault tolerance.*

Fig.: 9. Table: 12. References: 10.

Волокита Артем Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Volokyta Artem – PhD in Technical Science, Associate Professor of Department of Computer Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Pobedy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: artem.volokita@kpi.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9069-5544>

Scopus Author ID: 54421406500

Русінов Володимир Володимирович – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Rusinov Volodymyr – Student, Department of Computer Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (37 Pobedy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: volodymyr.r.v@ukr.net

Мугуєв Кирил Андрійович – студент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка (вул. Володимирська, 60, м. Київ, 01033, Україна).

Muhuiev Kyryl – Student, Department of Finance, Taras Shevchenko National University of Kyiv (60 Volodymyrska Str., 01033 Kyiv, Ukraine).

E-mail: Kirill.muguev@gmail.com