



# 1. Завдання (варіант 17)

Для виконання лабораторної роботи було обрано варіант 17:

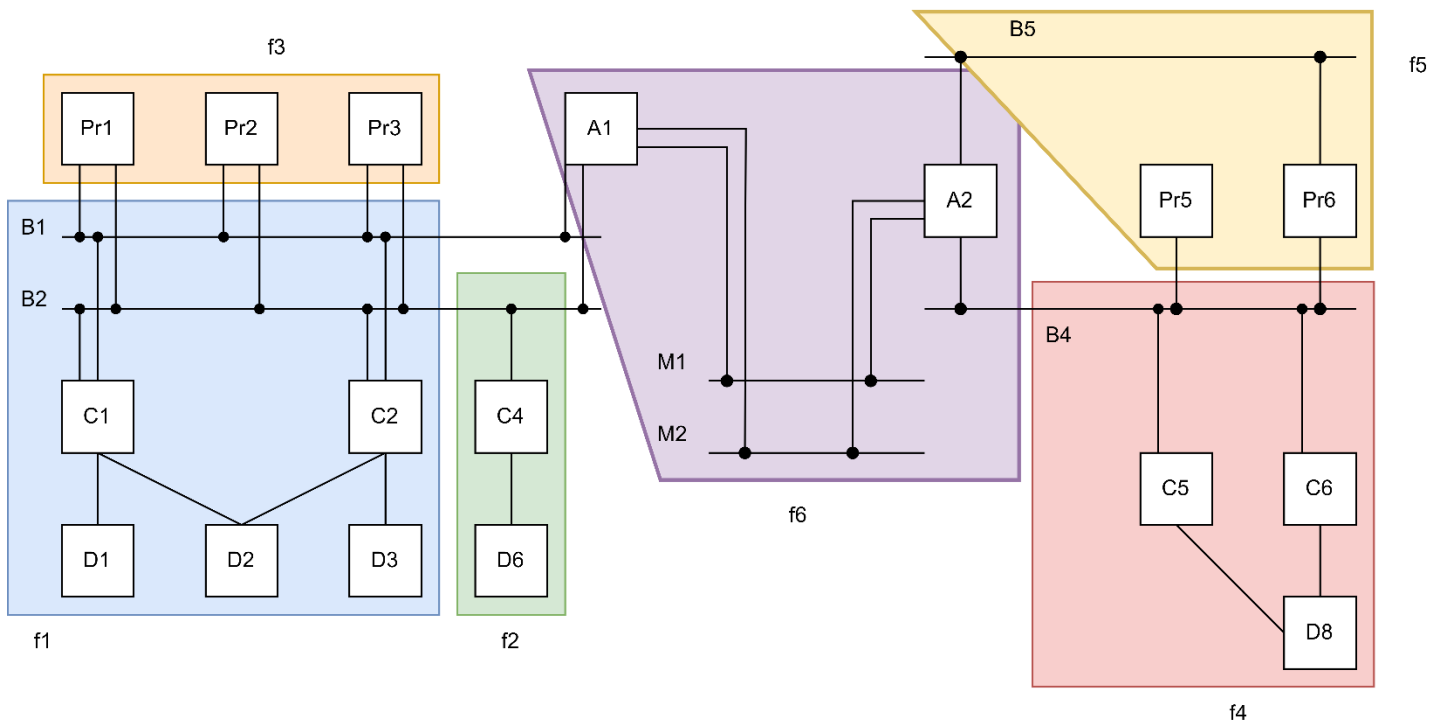


рис.1 Схема варіант 17

Складові логічної функції  $F$   $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6$ :

$$f_1 = (d_1 + d_2) * c_1 + (d_2 + d_3) * c_2 * (b_1 + b_2)$$

$$f_2 = d_6 * c_4 * b_2$$

$$f_3 = pr_1 * pr_2 * pr_3$$

$$f_4 = d_8 * (c_5 + c_6) * b_4$$

$$f_5 = pr_5 * pr_6 * b_5$$

$$f_6 = a_1 * a_2 * (m_1 + m_2)$$

$$F = f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * f_6$$

Таблиця реконфігурації ( $L_n$  – номінальне навантаження,  $L_m$  – максимальне навантаження):

	$L_n$	$L_m$	Перерозподіли навантаження
pr1	50	80	[pr2 = 25, pr3 = 25]
pr2	50	80	[pr1 = 25, pr3 = 25]
pr3	50	80	[pr1 = 25, pr2 = 25]
pr5	30	60	відсутні
pr6	30	60	відсутні

Таблиця вказує перерозподіли:

Якщо pr1 відмовив фізично – 25 одиниць навантаження додаються до pr2, 25 одиниць навантаження додаються до pr3.

Якщо pr2 відмовив фізично – 25 одиниць навантаження додаються до pr1, 25 одиниць навантаження додаються до pr3.

Якщо pr3 відмовив фізично – 25 одиниць навантаження додаються до pr1, 25 одиниць навантаження додаються до pr2.

Для процесорів pr5, pr6 перерозподіли відсутні.

## 2. Опис програмного рішення

Для автоматизації розрахунків було створено програму мовою C++, що обчислює надійність системи. Посилання на github репозиторій: [Bohdan628318ylypchenko/SchemeReliability: Scheme reliability lab by Bohdan Pylypchenko and Ihor Bezrukov](https://github.com/Bohdan628318ylypchenko/SchemeReliability).

Ключові особливості алгоритму та реалізації:

- Програма оброблює ВСІ можливі початкові вектори станів системи (для варіанту 17 кількість всіх можливих станів  $= 2^{23} = 8.388.608$ ). Для здійснення обчислень за прийнятний час програма використовує паралелізм: головний потік розподіляє вектори станів системи між потоками-обробниками згідно принципу "round robin" (подібно до того як карти розподіляються між гравцями у покері).
- Програма зберігає результати обчислень як набір .ssv файлів. У файлах зберігаються:
  - Початковий стан системи ( $F(sv1)$ ).
  - Стан системи після реконфігурації ( $F(sv2)$ ).
  - Імовірність виникнення стану  $sv1$ .
  - Значення «координат» вектору  $sv1$ .
  - Значення «координат» вектору  $sv2$ .
- Для більш глибокого аналізу надійності системи було створено скрипт мовою python (+ pandas). На основі .ssv файлів скрипт обчислює метрики:
  - Імовірність відмови для кожного елементу: сума імовірностей всіх  $sv1$ , у яких даний елемент відмовив.
  - Кількість відмов для кожного елементу.
  - Імовірність роботоздатності / відмови системи ( $P, Q$ ) в якості додаткової перевірки правильності розрахунків основної програми.
- Також скрипт перевіряє, чи виникли ситуації, коли  $F(sv1) = 1$  але  $F(sv2) = 0$ . Якщо така ситуація відсутня, реконфігурація є консистентною. В противному випадку конфігурація є неконсистентною.

Схема загального алгоритму обчислення надійності, що реалізований програмою, наведена на рис. 2.

файл: alrорithm.ixx  
 клас: SchemeReliabilityCalculator

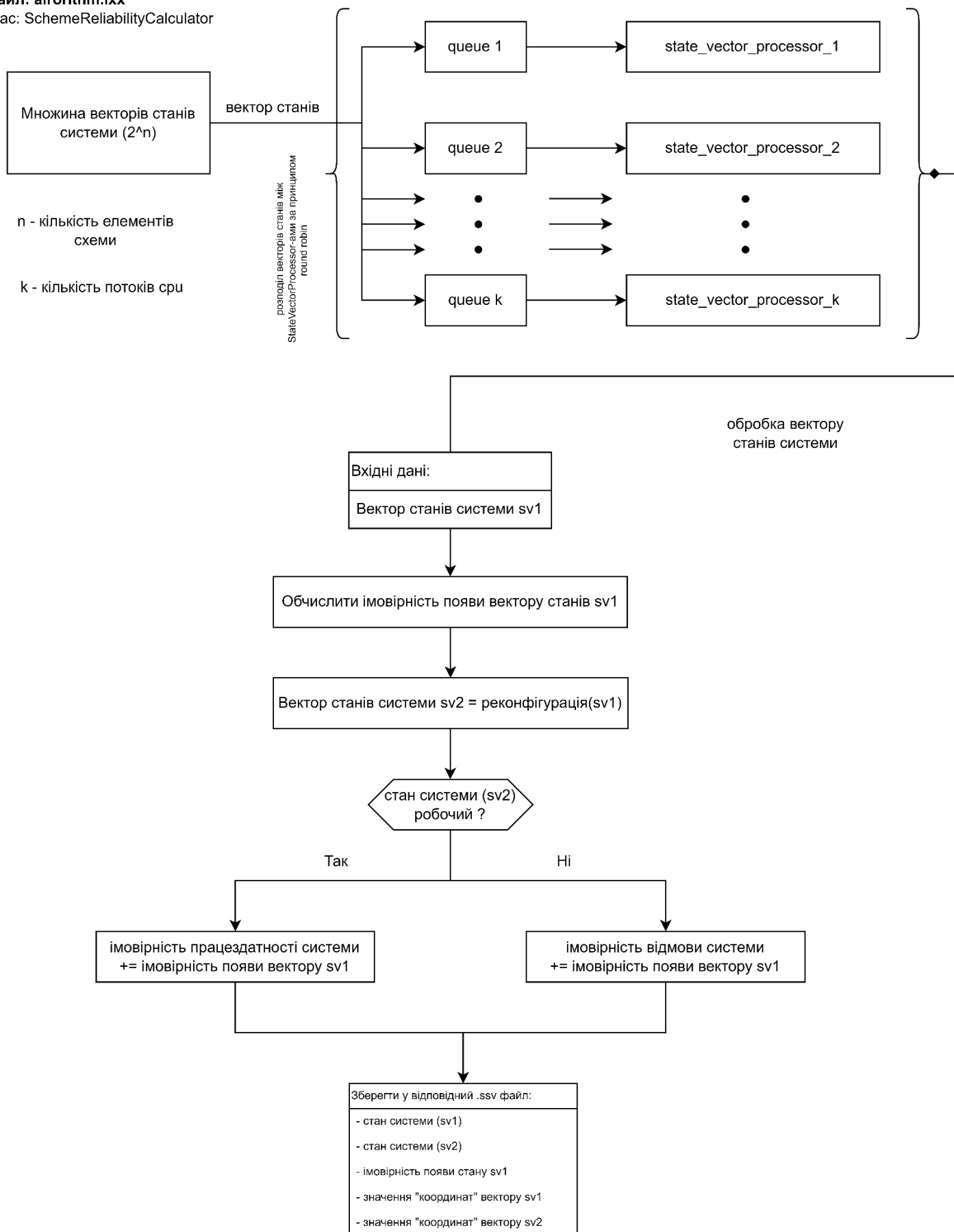


Рис. 2 Алгоритм обчислення надійності системи

У роботі реалізовано 2 алгоритми реконфігурації:

- Brute force (майже повний перебір всіх комбінацій перерозподілів).
- Жадібний алгоритм.

	Ln	Lm	Перерозподіли навантаження
pr1	50	100	[pr2 = 40, pr3 = 10], [pr2 = 30, pr3 = 20], [pr2 = 25, pr3 = 25], [pr2 = 20, pr3 = 30], [pr2 = 10, pr3 = 40], [pr2 = 50], [pr3 = 50]
pr2	50	100	[pr1 = 40, pr3 = 10], [pr1 = 30, pr3 = 20], [pr1 = 25, pr3 = 25], [pr1 = 20, pr3 = 30], [pr1 = 10, pr3 = 40], [pr1 = 50], [pr3 = 50]
pr3	50	100	[pr1 = 40, pr2 = 10], [pr1 = 30, pr2 = 20], [pr1 = 25, pr2 = 25], [pr1 = 20, pr2 = 30], [pr1 = 10, pr2 = 40], [pr1 = 50], [pr2 = 50]
pr5	30	60	[pr6 = 30], [pr1 = 20, pr2 = 20, pr3 = 20], [pr1 = 25, pr2 = 25], [pr2 = 25, pr3 = 25], [pr1 = 25, pr3 = 25], [pr1 = 30], [pr2 = 30], [pr3 = 30]
pr6	30	60	[pr5 = 30], [pr1 = 20, pr2 = 20, pr3 = 20], [pr1 = 25, pr2 = 25], [pr2 = 25, pr3 = 25], [pr1 = 25, pr3 = 25], [pr1 = 30], [pr2 = 30], [pr3 = 30]

Таблиця реконфігурацій задає набір можливих переходів (перерозподілів) навантажень для процесорів системи. Згідно таблиці вище, для процесорів pr1-3 маємо по 7 варіантів перерозподілів, для процесорів 5, 6 – по 8

Вважатимемо перерозподіл **можливим**, якщо всі процесори, на які відводиться навантаження, є робочими.

Вважатимемо перерозподіл **успішним**, якщо одночасно виконуються дві умови:

1. перерозподіл є можливим
2. навантаження на процесори перерозподілу менші за відповідні максимальні значення.

Нехай відмовили процесори 1, 3, 6. Тоді, згідно таблиці реконфігурації, існує  $7 * 7 * 8 = 392$  повних варіантів реконфігурації (комбінацій перерозподілів),  $7 * 7 + 2 * 7 * 8$  часткових реконфігурацій розмірності 2,  $7 + 7 + 8$  реконфігурацій розмірності 1. Разом 575 варіантів.

Ключові властивості brute force алгоритму:

- В основі алгоритму лежить обхід дерева вглибину за допомогою рекурсії.
- Обхід дерева зупиняється передчасно, якщо знайдено реконфігурацію, для якої  $F(sv2) = 1$ .
- Якщо не існує такої реконфігурації, що  $F(sv2) = 1$ , алгоритм обиратиме реконфігурацію із максимальною кількістю робочих елементів.
- Якщо перерозподіл, що розглядається, не є можливим (внаслідок виборів на попередніх рівнях дерева), алгоритм переходить на наступний рівень дерева, «перестрибуючи» перерозподіли поточного рівня. Такі «стрибки» є причиною появи «часткових» реконфігурацій. При цьому після того, як алгоритм дійде до останнього рівня дерева, обхід повернеться до пропущеного рівня дерева і перейде до інших перерозподілів пропущеного рівня.
- В найгіршому випадку алгоритм перебиратиме всі варіанти реконфігурації.

Схема brute force алгоритму зображена на рис. 3:

файл: algorithm.ixx

клас:

BruteForceReconfigurationTable

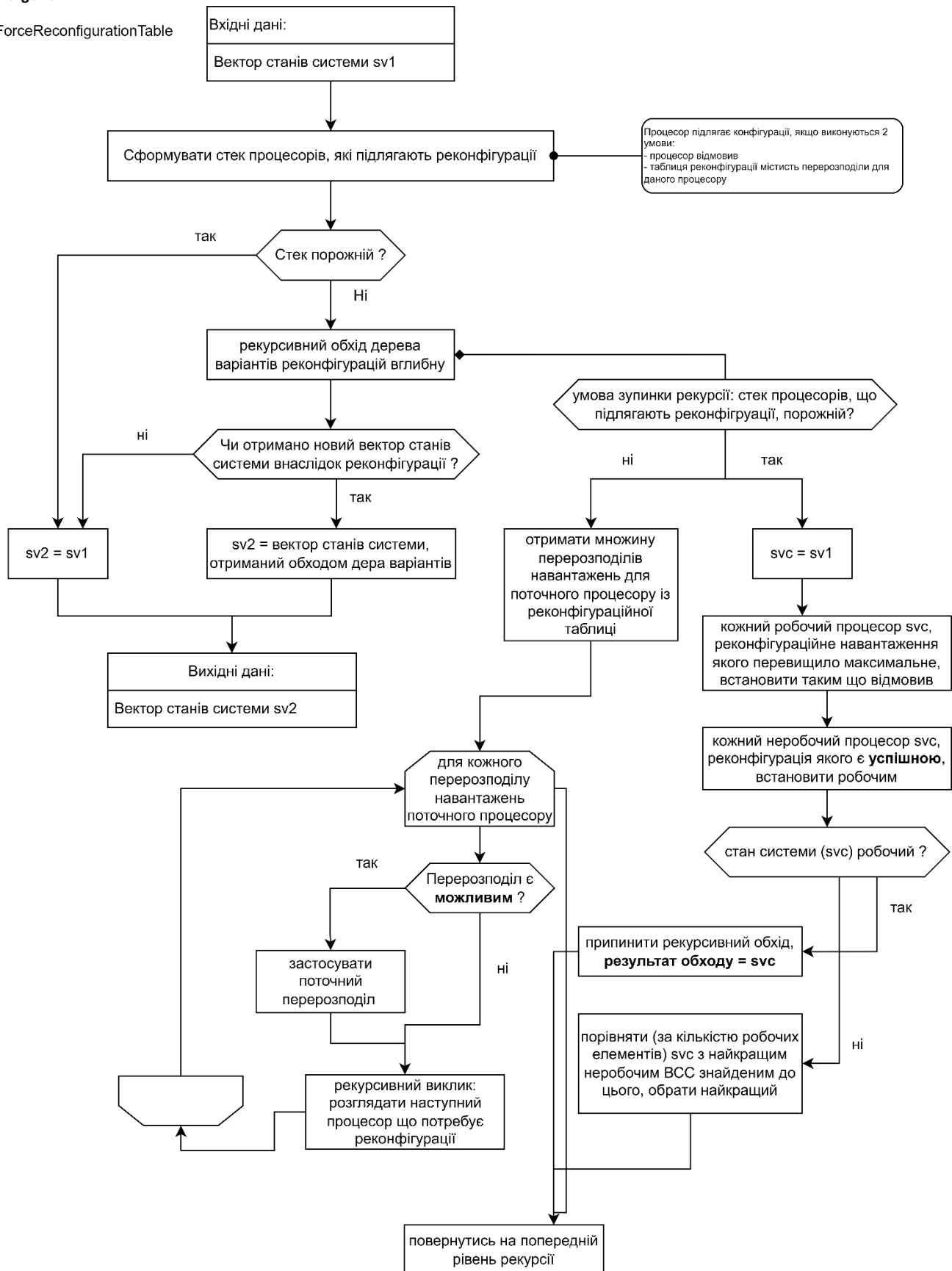


Рис. 3 Схема brute force алгоритму

Очевидно, алгоритм повного обходу дерева є повільним. З'являється потреба у алгоритмі, який, можливо, не знаходитиме найкращий варіант реконфігурації, але знаходитиме реконфігурацію задовільної якості за набагато менший час.

Введемо оцінку навантаження  $J$ :

$$J(l) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{l_i}{l_i^{(m)}} + \theta \left( 1 - \frac{l_i}{l_i^{(m)}} \right) * K \right)$$

де:

$n$  – кількість елементів системи

$l$  – вектор навантаження

$l^{(m)}$  – вектор максимальних навантажень

$\theta(x)$  – функція Гевісайда:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

$K$  – штрафний коефіцієнт. В роботі значення  $K$  рівне  $10^6$ .

Чим меншою є оцінка, тим кращим вважається навантаження.

На основі оцінки  $J$  було створено жадібний алгоритм:



файл: algorithm.ixx

клас: GreedyReconfigurationTable

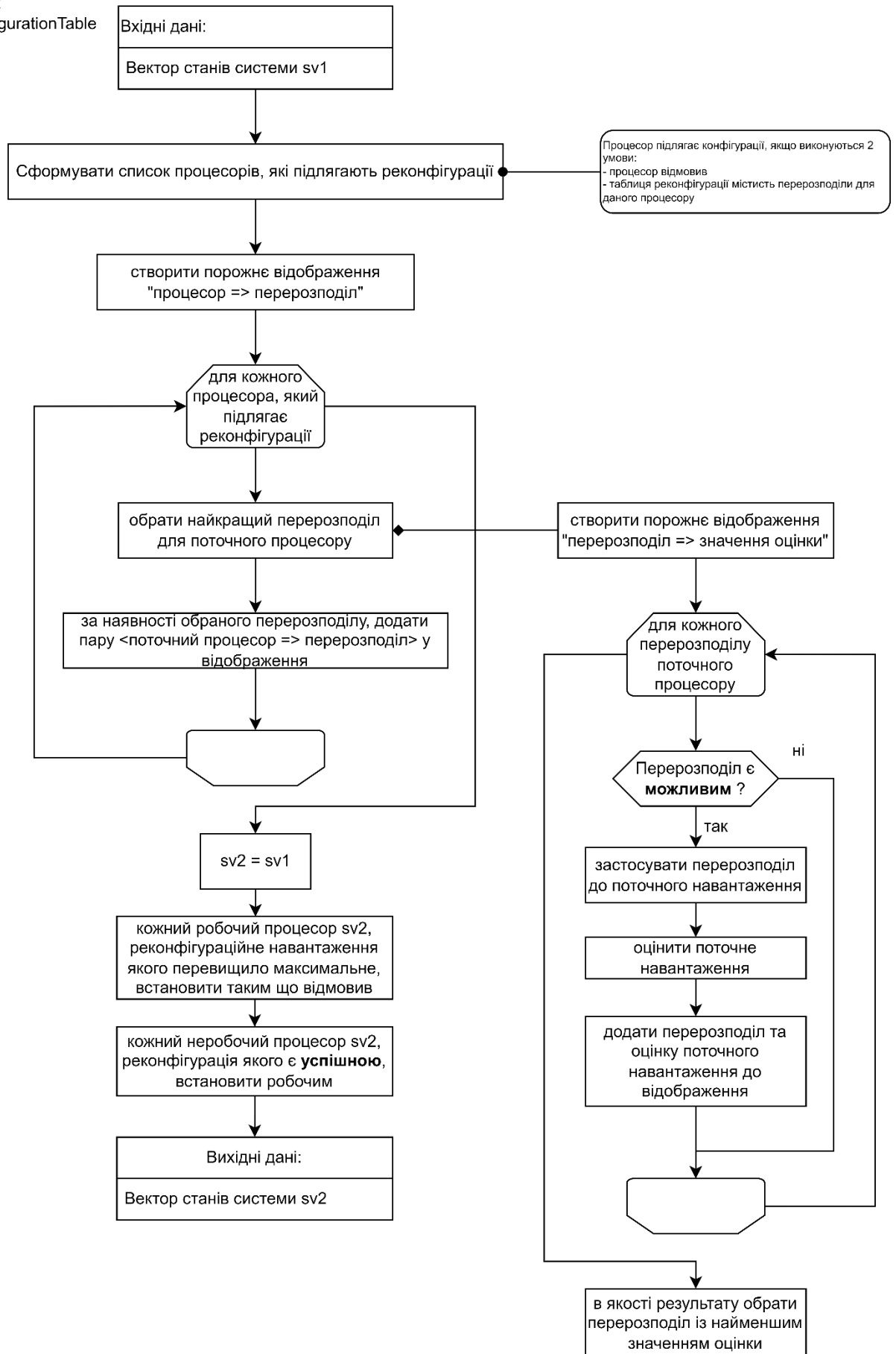


Рис.4 Схема жадібного алгоритму

Для кожного процесору, що потребує реконфігурації, алгоритм оцінює всі **можливі** (можливі у сенсі вищенаведеного визначення) перерозподіли, обирає найкращий. Таким чином для відмов pr1, pr3, pr6 замість 575 варіантів реконфігурацій жадібному алгоритму потрібно оцінити  $7 + 7 + 8 = 22$  перерозподіли. Іншими словами, жадібний алгоритм дозволив «позбутись» вибухової складності, спричиненої основним правилом комбінаторики.

### 3. Дослідження надійності

Через великі об'єми обчислень лабораторна робота виконувалась на AWS EC2, тип віртуальної машини – c7i.8xlarge (16 ядер / 32 потоки, 64 GB ddr5):

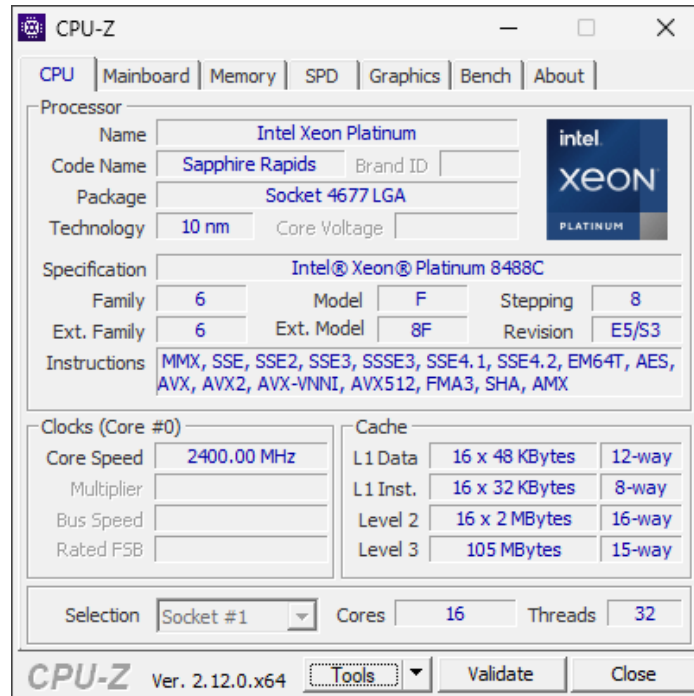


Рис. 5 Процесор, використаний для обчислень

Повний перелік характеристик vm можна переглянути у файлі ec2-specs.txt у репозиторії.

Вивід програми для всіх модифікацій схем (одиниця виміру часу – секунда):

```
PS C:\Users\Administrator\SchemeReliability\x64\Release> .\sr-research.exe
```

```
=== original s23 ===
```

```
Scheme type = greedy
```

```
time = 3
```

```
path = s23-original-greedy
```

```
sp = 0.9990208569798796, sq = 0.000979143020119051
```

```
state count = 8388608
```

```
Scheme type = brute
```

```
time = 3
```

```
path = s23-original-brute
```

```
sp = 0.9990208569798796, sq = 0.000979143020119051
```

```
state count = 8388608
```

```
=== s23 with rt (7 7 7 8 8) ===
```

Scheme type = greedy  
time = 2  
path = s23-77788-greedy  
sp = 0.9992607082975051, sq = 0.0007392917024915616  
state count = 8388608

Scheme type = brute  
time = 18  
path = s23-77788-brute  
sp = 0.9992607082975051, sq = 0.0007392917024915616  
state count = 8388608

=== s23 with rt and modified connections ===

Scheme type = greedy  
time = 3  
path = s23-77788-modified-connections-greedy  
sp = 0.999737721521635, sq = 0.0002622784783607316  
state count = 8388608

Scheme type = brute  
time = 13  
path = s23-77788-modified-connections-brute  
sp = 0.999737721521635, sq = 0.0002622784783607316  
state count = 8388608

=== s24 with d9 right ===

Scheme type = greedy  
time = 1  
path = s24-d9-right-greedy  
sp = 0.9997597157515095, sq = 0.00024028424848725232  
state count = 16777216

Scheme type = brute  
time = 35  
path = s24-d9-right-brute  
sp = 0.9997597157515095, sq = 0.00024028424848725232  
state count = 16777216

=== s25 with d9 d10 right ===

Scheme type = greedy  
time = 8  
path = s25-d9-d10-right-greedy  
sp = 0.9997597162353798, sq = 0.00024028376461419955  
state count = 33554432

Scheme type = brute  
time = 61  
path = s25-d9-d10-right-brute  
sp = 0.9997597162353798, sq = 0.00024028376461419955  
state count = 33554432

=== s27 with d9 d10 c7 right c8 left ===

Scheme type = greedy  
time = 77  
path = s27-d9-d10-c7-right-c8-left-greedy  
sp = 0.9997598842949585, sq = 0.00024011570500589362  
state count = 134217728

Scheme type = brute  
time = 220  
path = s27-d9-d10-c7-right-c8-left-brute  
sp = 0.9997598842949585, sq = 0.00024011570500589362  
state count = 134217728

=== s29 with d9 d10 c7 right c8 left a4 ===

Scheme type = greedy  
time = 397  
path = s29-d9-d10-c7-right-c8-left-a4-greedy  
sp = 0.999999841063663, sq = 1.5893623277066473e-07  
state count = 536870912

Scheme type = brute  
time = 1022  
path = s29-d9-d10-c7-right-c8-left-a4-brute  
sp = 0.999999841063663, sq = 1.5893623277066473e-07  
state count = 536870912

PS C:\Users\Administrator\SchemeReliability\x64\Release>

3.1 Початкова схема

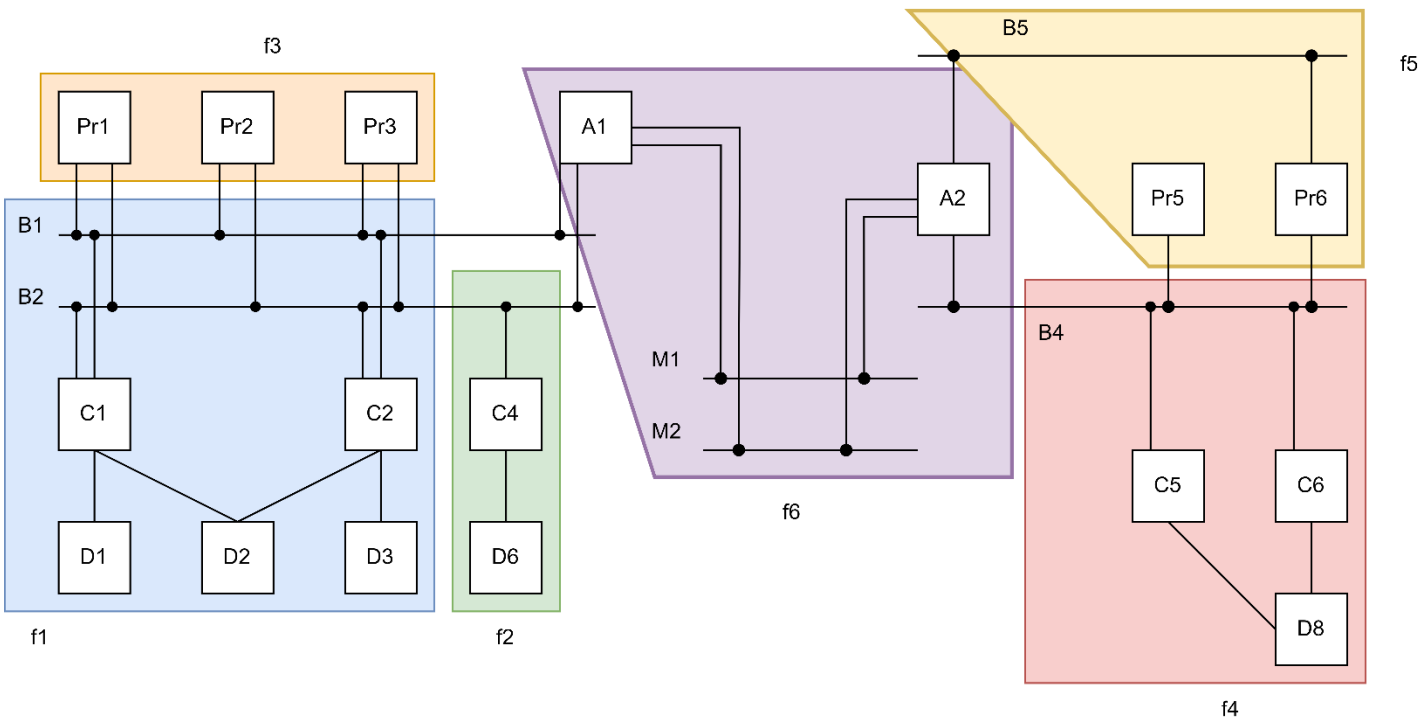


Рис. 6 Оригінальна схема

Опис логічної функції:

$f1 = (d1 + d2) * c1 + (d2 + d3) * c2 * (b1 + b2)$

$f2 = d6 * c4 * b2$

$f3 = pr1 * pr2 * pr3$

$f4 = d8 * (c5 + c6) * b4$

$f5 = pr5 * pr6 * b5$

$f6 = a1 * a2 * (m1 + m2)$

$F = f1 * f2 * f3 * f4 * f5 * f6$

Таблиця реконфігурації:

	Ln	Lm	Перерозподіли навантаження
pr1	50	80	[pr2 = 25, pr3 = 25]
pr2	50	80	[pr1 = 25, pr3 = 25]
pr3	50	80	[pr1 = 25, pr2 = 25]
pr5	30	60	відсутні
pr6	30	60	відсутні

Опис експерименту в коді (файл research.ixx):

```
constexpr size_t all_count { 23 };  
constexpr size_t processor_count { 5 };
```

SchemeDto<all\_count, processor\_count> scheme

```
{
    .elements =
    {
        ElementDto { .name = "a1", .p = ppa, .q = qpa },
        ElementDto { .name = "a2", .p = ppa, .q = qpa },
        ElementDto { .name = "b1", .p = ppb, .q = qpb },
        ElementDto { .name = "b2", .p = ppb, .q = qpb },
        ElementDto { .name = "b4", .p = ppb, .q = qpb },
        ElementDto { .name = "b5", .p = ppb, .q = qpb },
        ElementDto { .name = "c1", .p = ppc, .q = qpc },
        ElementDto { .name = "c2", .p = ppc, .q = qpc },
        ElementDto { .name = "c4", .p = ppc, .q = qpc },
        ElementDto { .name = "c5", .p = ppc, .q = qpc },
        ElementDto { .name = "c6", .p = ppc, .q = qpc },
        ElementDto { .name = "d1", .p = ppd, .q = qpd },
        ElementDto { .name = "d2", .p = ppd, .q = qpd },
        ElementDto { .name = "d3", .p = ppd, .q = qpd },
        ElementDto { .name = "d6", .p = ppd, .q = qpd },
        ElementDto { .name = "d8", .p = ppd, .q = qpd },
        ElementDto { .name = "m1", .p = ppm, .q = qpm },
        ElementDto { .name = "m2", .p = ppm, .q = qpm }
    },
    .processors =
    {
        ProcessorDto
        {
            .name = "pr1", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 50, .max_load = 80,
            .transitions = { { TrUnit { 1, 25 }, TrUnit { 2, 25 } } }
        },
        ProcessorDto
        {
            .name = "pr2", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 50, .max_load = 80,
            .transitions = { { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 2, 25 } } }
        },
        ProcessorDto
        {
            .name = "pr3", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 50, .max_load = 80,
            .transitions = { { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 1, 25 } } }
        },
        ProcessorDto
        {
            .name = "pr4", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 30, .max_load = 60,
            .transitions = { }
        },
        ProcessorDto
        {

```

```

        .name = "pr5", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 30, .max_load = 60,
        .transitions = { }
    }
},
.scheme_function = [](const StateVectorDto<all_count, processor_count>& sv)
{
    span<bool> s = sv.all;

    bool f1 = ((s[16] + s[17]) * s[11] + (s[17] + s[18]) * s[12]) * (s[7] + s[8]);
    bool f2 = s[19] * s[13] * s[8];
    bool f3 = s[0] * s[1] * s[2];
    bool f4 = s[20] * (s[14] + s[15]) * s[9];
    bool f5 = s[3] * s[4] * s[10];
    bool f6 = s[5] * s[6] * (s[21] + s[22]);

    return f1 * f2 * f3 * f4 * f5 * f6;
}
};

scheme.scheme_name = "s23-original-greedy";
scheme.type = SchemeType::Greedy;
Utils::process_scheme(scheme);

scheme.scheme_name = "s23-original-brute";
scheme.type = SchemeType::Brute;
Utils::process_scheme(scheme);

```

Результати виконання програми:

```

3   === original s23 ===
4
5   Scheme type = greedy
6   time = 3
7   path = s23-original-greedy
8   sp = 0.9990208569798796, sq = 0.000979143020119051
9   state count = 8388608
10
11  Scheme type = brute
12  time = 3
13  path = s23-original-brute
14  sp = 0.9990208569798796, sq = 0.000979143020119051
15  state count = 8388608

```

Метрики (жадібний алгоритм ліворуч, повний обхід дерева - праворуч):



```
In [6]: process_sample_with_fail_count_per_123("s23-original-greedy")
```

```
=== sum probabilities ===
p = 0.9990208569798807
q = 0.0009791430201191219
p + q = 0.9999999999999999
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 2.87982720e-08
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 2.87982720e-08
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 2.87982720e-08
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
b1: sv1 = 2.00805635e-08, sv2 = 1.46871453e-08
b2: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
b4: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
b5: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
c1: sv1 = 7.16675097e-07, sv2 = 5.69315417e-07
c2: sv1 = 7.16675097e-07, sv2 = 5.69315417e-07
c4: sv1 = 4.10000000e-04, sv2 = 4.10000000e-04
c5: sv1 = 7.16674899e-07, sv2 = 5.69315219e-07
c6: sv1 = 7.16674899e-07, sv2 = 5.69315219e-07
d1: sv1 = 2.94517019e-08, sv2 = 2.15413552e-08
d2: sv1 = 2.94518999e-08, sv2 = 2.15415534e-08
d3: sv1 = 2.94517019e-08, sv2 = 2.15413552e-08
d6: sv1 = 2.20000000e-05, sv2 = 2.20000000e-05
d8: sv1 = 2.20000000e-05, sv2 = 2.20000000e-05
m1: sv1 = 6.11313451e-07, sv2 = 4.81917997e-07
m2: sv1 = 6.11313451e-07, sv2 = 4.81917997e-07
=== sum fail count(sv1 | sv2) per pr1 * pr2 * pr3 state set ===
case 0: sv1 = 1048576; sv2 = 4194304
case 1: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 2: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 3: sv1 = 1048576; sv2 = 1048576
case 4: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 5: sv1 = 1048576; sv2 = 1048576
case 6: sv1 = 1048576; sv2 = 1048576
case 7: sv1 = 1048576; sv2 = 1048576
```

```
In [7]: process_sample_with_fail_count_per_123("s23-original-brute")
```

```
=== sum probabilities ===
p = 0.9990208569798807
q = 0.0009791430201191219
p + q = 0.9999999999999999
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 2.87982720e-08
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 2.87982720e-08
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 2.87982720e-08
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
b1: sv1 = 2.00805635e-08, sv2 = 1.46871453e-08
b2: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
b4: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
b5: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
c1: sv1 = 7.16675097e-07, sv2 = 5.69315417e-07
c2: sv1 = 7.16675097e-07, sv2 = 5.69315417e-07
c4: sv1 = 4.10000000e-04, sv2 = 4.10000000e-04
c5: sv1 = 7.16674899e-07, sv2 = 5.69315219e-07
c6: sv1 = 7.16674899e-07, sv2 = 5.69315219e-07
d1: sv1 = 2.94517019e-08, sv2 = 2.15413552e-08
d2: sv1 = 2.94518999e-08, sv2 = 2.15415534e-08
d3: sv1 = 2.94517019e-08, sv2 = 2.15413552e-08
d6: sv1 = 2.20000000e-05, sv2 = 2.20000000e-05
d8: sv1 = 2.20000000e-05, sv2 = 2.20000000e-05
m1: sv1 = 6.11313451e-07, sv2 = 4.81917997e-07
m2: sv1 = 6.11313451e-07, sv2 = 4.81917997e-07
=== sum fail count(sv1 | sv2) per pr1 * pr2 * pr3 state set ===
case 0: sv1 = 1048576; sv2 = 4194304
case 1: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 2: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 3: sv1 = 1048576; sv2 = 1048576
case 4: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 5: sv1 = 1048576; sv2 = 1048576
case 6: sv1 = 1048576; sv2 = 1048576
case 7: sv1 = 1048576; sv2 = 1048576
```

1. Результати алгоритмів є однаковими.
2. Маємо надійність, що є меншою за 0.9999. Поставимо за мету досягнути надійність, більшу або рівну 0.9999.
3. Реконфігурація очікувано зменшила імовірність відмови процесорів 1, 2, 3.
4. Імовірність відмови процесорів 5 і 6 очікувано не змінилась – перерозподіли для цих процесорів відсутні у таблиці реконфігурації.
5. Час виконання обох алгоритмів – 3 секунди. Схоже розмірність обчислень ( $2^{23} = 8388608$ ) і мала кількість варіантів реконфігурації для початкової схеми є недостатньо великою щоб різниця між алгоритмами була помітна.

## 3.2 Модифікація 1: 7-7-7-8-8

Модифікуємо таблицю реконфігурації (додамо перерозподіли, збільшимо максимальне навантаження для процесорів 1, 2, 3 із 80 до 100):

	Ln	Lm	Перерозподіли навантаження
pr1	50	100	[pr2 = 40, pr3 = 10], [pr2 = 30, pr3 = 20], [pr2 = 25, pr3 = 25], [pr2 = 20, pr3 = 30], [pr2 = 10, pr3 = 40], [pr2 = 50], [pr3 = 50]
pr2	50	100	[pr1 = 40, pr3 = 10], [pr1 = 30, pr3 = 20], [pr1 = 25, pr3 = 25], [pr1 = 20, pr3 = 30], [pr1 = 10, pr3 = 40], [pr1 = 50], [pr3 = 50]
pr3	50	100	[pr1 = 40, pr2 = 10], [pr1 = 30, pr2 = 20], [pr1 = 25, pr2 = 25], [pr1 = 20, pr2 = 30], [pr1 = 10, pr2 = 40], [pr1 = 50], [pr2 = 50]
pr5	30	60	[pr6 = 30], [pr1 = 20, pr2 = 20, pr3 = 20], [pr1 = 25, pr2 = 25], [pr2 = 25, pr3 = 25], [pr1 = 25, pr3 = 25], [pr1 = 30], [pr2 = 30], [pr3 = 30]

pr6	30	60	[pr5 = 30], [pr1 = 20, pr2 = 20, pr3 = 20], [pr1 = 25, pr2 = 25], [pr2 = 25, pr3 = 25], [pr1 = 25, pr3 = 25], [pr1 = 30], [pr2 = 30], [pr3 = 30]
-----	----	----	--

Інші параметри схеми залишимо без змін.

Опис нової таблиці реконфігурації в коді (файл research.ixx):

```
constexpr size_t all_count { 23 };

constexpr size_t processor_count { 5 };

...

.processors =
{
    ProcessorDto
    {
        .name = "pr1", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 50, .max_load = 100,
        .transitions =
        {
            { TrUnit { 1, 50 } },
            { TrUnit { 2, 50 } },
            { TrUnit { 1, 25 }, TrUnit { 2, 25 } },
            { TrUnit { 1, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
            { TrUnit { 1, 25 }, TrUnit { 4, 30 } },
            { TrUnit { 2, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
            { TrUnit { 2, 25 }, TrUnit { 4, 30 } }
        }
    },
    ProcessorDto
    {
        .name = "pr2", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 50, .max_load = 100,
        .transitions =
        {
            { TrUnit { 0, 50 } },
            { TrUnit { 2, 50 } },
            { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 2, 25 } },
            { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
            { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 4, 30 } },
            { TrUnit { 2, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
            { TrUnit { 2, 25 }, TrUnit { 4, 30 } }
        }
    },
    ProcessorDto
    {
        .name = "pr3", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 50, .max_load = 100,
        .transitions =
        {
            { TrUnit { 0, 50 } },
            { TrUnit { 1, 50 } },
            { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 1, 25 } },
```

```

        { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
        { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 4, 30 } },
        { TrUnit { 1, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
        { TrUnit { 1, 25 }, TrUnit { 4, 30 } }
    }
},
ProcessorDto
{
    .name = "pr4", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 30, .max_load = 60,
    .transitions =
    {
        { TrUnit { 4, 30 } },
        { TrUnit { 0, 35 } },
        { TrUnit { 1, 35 } },
        { TrUnit { 2, 35 } },
        { TrUnit { 0, 18 }, TrUnit { 1, 18 } },
        { TrUnit { 1, 18 }, TrUnit { 2, 18 } },
        { TrUnit { 0, 18 }, TrUnit { 2, 18 } },
        { TrUnit { 0, 12 }, TrUnit { 1, 12 }, TrUnit { 2, 12 } }
    }
},
ProcessorDto
{
    .name = "pr5", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 30, .max_load = 60,
    .transitions =
    {
        { TrUnit { 3, 30 } },
        { TrUnit { 0, 35 } },
        { TrUnit { 1, 35 } },
        { TrUnit { 2, 35 } },
        { TrUnit { 0, 18 }, TrUnit { 1, 18 } },
        { TrUnit { 1, 18 }, TrUnit { 2, 18 } },
        { TrUnit { 0, 18 }, TrUnit { 2, 18 } },
        { TrUnit { 0, 12 }, TrUnit { 1, 12 }, TrUnit { 2, 12 } }
    }
}
},

```

```

scheme.scheme_name = "s23-77788-greedy";

```

```

scheme.type = SchemeType::Greedy;

```

```

Utils::process_scheme(scheme);

```

```

scheme.scheme_name = "s23-77788-brute";

```

```

scheme.type = SchemeType::Brute;

```

```

Utils::process_scheme(scheme);

```

Результати виконання програми:

```

17  === s23 with rt (7 7 7 8 8) ===
18
19  Scheme type = greedy
20  time = 2
21  path = s23-77788-greedy
22  sp = 0.9992607082975051, sq = 0.0007392917024916249
23  state count = 8388608
24
25  Scheme type = brute
26  time = 18
27  path = s23-77788-brute
28  sp = 0.9992607082975051, sq = 0.0007392917024916249
29  state count = 8388608

```

Метрики (жадібний алгоритм ліворуч, повний обхід дерева - праворуч):

In [8]: process\_sample\_with\_fail\_count\_per\_123("s23-77788-greedy")

```

=== sum probabilities ===
p = 0.9992607082975082
q = 0.0007392917024916249
p + q = 0.9999999999999999
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
b1: sv1 = 2.00805635e-08, sv2 = 1.10893755e-08
b2: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
b4: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
b5: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
c1: sv1 = 7.16675097e-07, sv2 = 4.71016679e-07
c2: sv1 = 7.16675097e-07, sv2 = 4.71016679e-07
c4: sv1 = 4.10000000e-04, sv2 = 4.10000000e-04
c5: sv1 = 7.16674899e-07, sv2 = 4.71016481e-07
c6: sv1 = 7.16674899e-07, sv2 = 4.71016481e-07
d1: sv1 = 2.94517019e-08, sv2 = 1.62646263e-08
d2: sv1 = 2.94518999e-08, sv2 = 1.62648245e-08
d3: sv1 = 2.94517019e-08, sv2 = 1.62646263e-08
d6: sv1 = 2.20000000e-05, sv2 = 2.20000000e-05
d8: sv1 = 2.20000000e-05, sv2 = 2.20000000e-05
m1: sv1 = 6.11313451e-07, sv2 = 3.95602596e-07
m2: sv1 = 6.11313451e-07, sv2 = 3.95602596e-07
=== sum fail count(sv1 | sv2) per pr1 * pr2 * pr3 state set ===
case 0: sv1 = 1048576; sv2 = 4194304
case 1: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 2: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 3: sv1 = 1048576; sv2 = 524288
case 4: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 5: sv1 = 1048576; sv2 = 524288
case 6: sv1 = 1048576; sv2 = 524288
case 7: sv1 = 1048576; sv2 = 2621440

```

In [9]: process\_sample\_with\_fail\_count\_per\_123("s23-77788-brute")

```

=== sum probabilities ===
p = 0.9992607082975082
q = 0.0007392917024916249
p + q = 0.9999999999999999
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.72800000e-12
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 8.63875589e-12
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 6.22030234e-16
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
b1: sv1 = 2.00805635e-08, sv2 = 1.10893755e-08
b2: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
b4: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
b5: sv1 = 1.50000000e-05, sv2 = 1.50000000e-05
c1: sv1 = 7.16675097e-07, sv2 = 4.71016679e-07
c2: sv1 = 7.16675097e-07, sv2 = 4.71016679e-07
c4: sv1 = 4.10000000e-04, sv2 = 4.10000000e-04
c5: sv1 = 7.16674899e-07, sv2 = 4.71016481e-07
c6: sv1 = 7.16674899e-07, sv2 = 4.71016481e-07
d1: sv1 = 2.94517019e-08, sv2 = 1.62646263e-08
d2: sv1 = 2.94518999e-08, sv2 = 1.62648245e-08
d3: sv1 = 2.94517019e-08, sv2 = 1.62646263e-08
d6: sv1 = 2.20000000e-05, sv2 = 2.20000000e-05
d8: sv1 = 2.20000000e-05, sv2 = 2.20000000e-05
m1: sv1 = 6.11313451e-07, sv2 = 3.95602596e-07
m2: sv1 = 6.11313451e-07, sv2 = 3.95602596e-07
=== sum fail count(sv1 | sv2) per pr1 * pr2 * pr3 state set ===
case 0: sv1 = 1048576; sv2 = 4980736
case 1: sv1 = 1048576; sv2 = 786432
case 2: sv1 = 1048576; sv2 = 1572864
case 3: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 4: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 5: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 6: sv1 = 1048576; sv2 = 0
case 7: sv1 = 1048576; sv2 = 1048576

```

1. Імовірність безвідмовної роботи системи збільшилась: 0.9992 проти 0.9990.
2. Результати реконфігурації відрізняються: алгоритм повного обходу знаходить комбінації перерозподілів, у яких кількість робочих процесорів є більшою у порівнянні з реконфігураціями, знайденими жадібним алгоритмом. При цьому різниця є несуттєвою, адже не вплинула на кінцеве значення імовірності безвідмовної роботи системи.
3. Помітна різниця у складності алгоритмів: жадібний алгоритм закінчив обчислення за 2 секунди, для повного обходу знадобилось 18 секунд.

### 3.3 Модифікація 2: з'єднання елементів

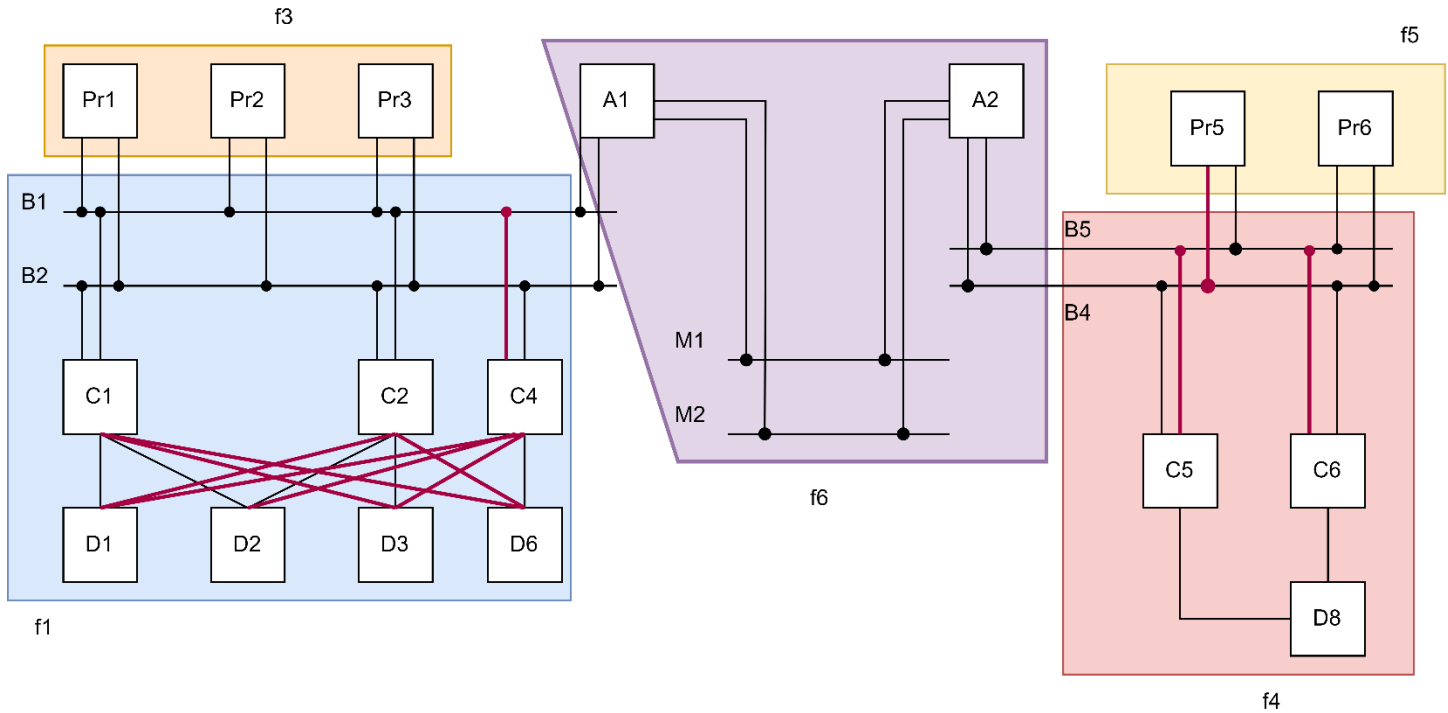


Рис. 7 Схема з модифікованими з'єднаннями

Утворимо додаткові з'єднання (на рисунку позначені червоним кольором).

Внаслідок нових з'єднань логічна функція матиме вид:

$$f1 = (d1 + d2 + d3 + d4) * (c1 + c2 + c4) * (b1 + b2)$$

$$f3 = pr1 * pr2 * pr3$$

$$f4 = d8 * (c5 + c6) * (b4 + b5)$$

$$f5 = pr5 * pr6$$

$$f6 = a1 * a2 * (m1 + m2)$$

$$F = f1 * f3 * f4 * f5 * f6$$

Інші параметри залишимо без змін.

Опис нової логічної функції:

```
.scheme_function = [(const StateVectorDto<all_count, processor_count>& sv)
{
    span<bool> s = sv.all;

    bool f1 = (s[16] + s[17] + s[18] + s[19]) * (s[11] + s[12] + s[13]) * (s[7] + s[8]);
    bool f3 = s[0] * s[1] * s[2];
    bool f4 = s[20] * (s[14] + s[15]) * (s[9] + s[10]);
    bool f5 = s[3] * s[4];
    bool f6 = s[5] * s[6] * (s[21] + s[22]);
```

```

    return f1 * f3 * f4 * f5 * f6;
}

```

Результати виконання програми:

```

31  === s23 with rt and modified connections ===
32
33  Scheme type = greedy
34  time = 3
35  path = s23-77788-modified-connections-greedy
36  sp = 0.999737721521635, sq = 0.0002622784783607316
37  state count = 8388608
38
39  Scheme type = brute
40  time = 13
41  path = s23-77788-modified-connections-brute
42  sp = 0.999737721521635, sq = 0.0002622784783607316
43  state count = 8388608

```

Метрики (жадібний алгоритм ліворуч, повний обхід дерева – праворуч):

<pre> In [10]: process_sample_with_del("s23-77788-modified-connections-greedy")  === sum probabilities === p = 0.999737721521639 q = 0.0002622784783607359 p + q = 0.9999999999999997 === reconfiguration is consistent === === sum fail probability(sv1   sv2) per element === pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11 pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11 pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11 pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11 pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11 a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04 a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04 b1: sv1 = 1.31544599e-08, sv2 = 4.15911479e-09 b2: sv1 = 1.31544599e-08, sv2 = 4.15911479e-09 b4: sv1 = 1.31544599e-08, sv2 = 4.15911479e-09 b5: sv1 = 1.31544599e-08, sv2 = 4.15911479e-09 c1: sv1 = 3.53479464e-07, sv2 = 1.07603051e-07 c2: sv1 = 3.53479464e-07, sv2 = 1.07603051e-07 c4: sv1 = 3.53479464e-07, sv2 = 1.07603051e-07 c5: sv1 = 5.21296899e-07, sv2 = 2.75521212e-07 c6: sv1 = 5.21296899e-07, sv2 = 2.75521212e-07 d1: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09 d2: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09 d3: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09 d6: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09 d8: sv1 = 2.20000000e-05, sv2 = 2.20000000e-05 m1: sv1 = 4.39753462e-07, sv2 = 2.23939634e-07 m2: sv1 = 4.39753462e-07, sv2 = 2.23939634e-07 </pre>	<pre> In [11]: process_sample_with_del("s23-77788-modified-connections-brute")  === sum probabilities === p = 0.999737721521639 q = 0.0002622784783607359 p + q = 0.9999999999999997 === reconfiguration is consistent === === sum fail probability(sv1   sv2) per element === pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.72800000e-12 pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 8.63875589e-12 pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12 pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 6.22030234e-16 pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12 a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04 a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04 b1: sv1 = 1.31544599e-08, sv2 = 4.15911479e-09 b2: sv1 = 1.31544599e-08, sv2 = 4.15911479e-09 b4: sv1 = 1.31544599e-08, sv2 = 4.15911479e-09 b5: sv1 = 1.31544599e-08, sv2 = 4.15911479e-09 c1: sv1 = 3.53479464e-07, sv2 = 1.07603051e-07 c2: sv1 = 3.53479464e-07, sv2 = 1.07603051e-07 c4: sv1 = 3.53479464e-07, sv2 = 1.07603051e-07 c5: sv1 = 5.21296899e-07, sv2 = 2.75521212e-07 c6: sv1 = 5.21296899e-07, sv2 = 2.75521212e-07 d1: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09 d2: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09 d3: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09 d6: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09 d8: sv1 = 2.20000000e-05, sv2 = 2.20000000e-05 m1: sv1 = 4.39753462e-07, sv2 = 2.23939634e-07 m2: sv1 = 4.39753462e-07, sv2 = 2.23939634e-07 </pre>
--	---

1. Імовірність безвідмовної роботи збільшилась: 0.9997 проти 0.9992.
2. Результати реконфігурації відрізняються: алгоритм повного обходу знаходить комбінації перерозподілів, у яких кількість робочих процесорів є більшою у порівнянні з реконфігураціями, знайденими жадібним алгоритмом. При цьому різниця є несуттєвою, адже не вплинула на кінцеве значення імовірності безвідмовної роботи системи.
3. Жадібний алгоритм знову демонструє перевагу у швидкодії: 2 секунди проти 13 секунд.

### 3.4 Модифікація 3: 24 елементи (d9)

Судячи із обчислених імовірностей відмов кожного елементу, реконфігурація успішно компенсує фізичні відмови процесорів, головним джерелом відмов є контролери. Тому для подальшого збільшення надійності необхідно дублювати існуючі методи паралельним з'єднанням.

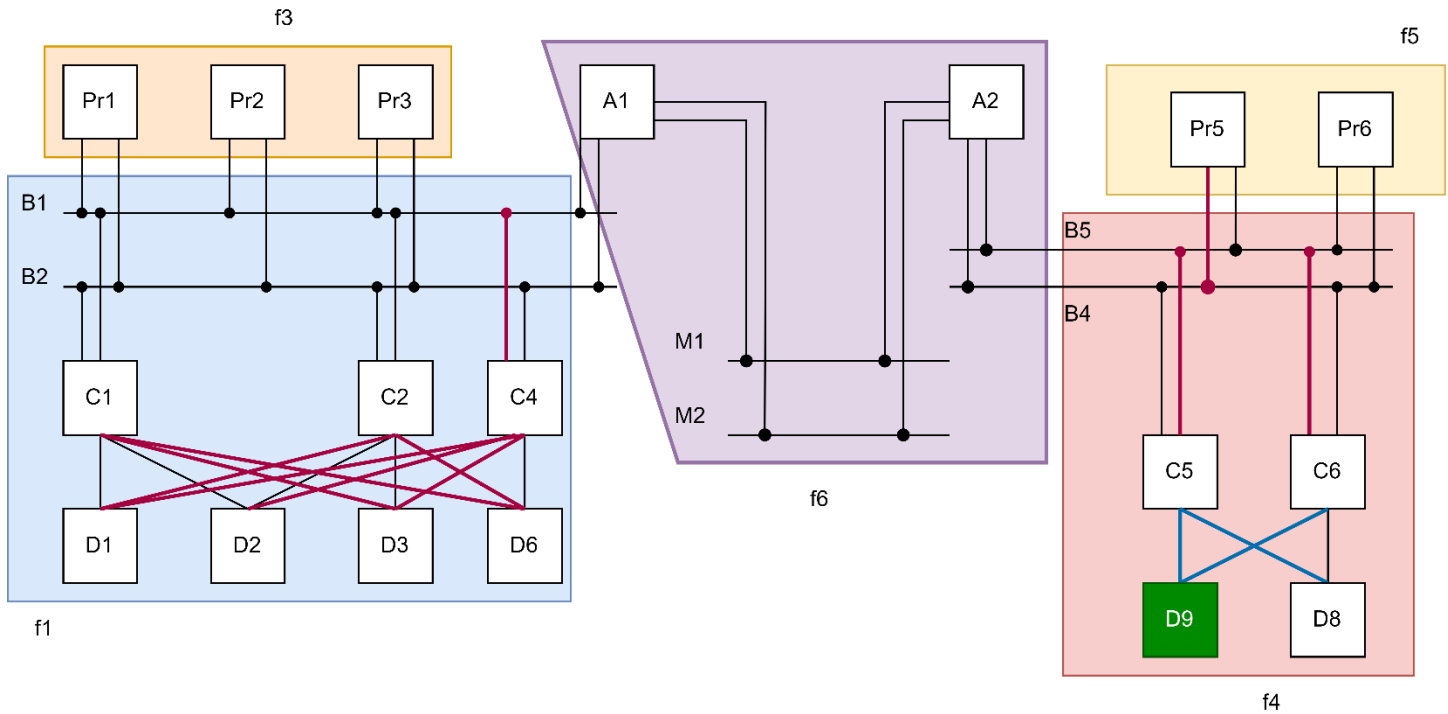


Рис. 8 Схема з новим елементом d9 (всього 24 елементи)

Додавання нового елемента d9 відобразиться на виді логічної функції:

$$f4 = (d8 + d9) * (c5 + c6) * (b4 + b5)$$

Інші параметри залишимо без змін.

Результати роботи програми:

```

45  === s24 with d9 right ===
46
47  Scheme type = greedy
48  time = 1
49  path = s24-d9-right-greedy
50  sp = 0.9997597157515095, sq = 0.00024028424848725232
51  state count = 16777216
52
53  Scheme type = brute
54  time = 35
55  path = s24-d9-right-brute
56  sp = 0.9997597157515095, sq = 0.00024028424848725232
57  state count = 16777216

```

Метрики:

```
In [12]: process_sample_with_del("s24-d9-right-greedy")
```

```
=== sum probabilities ===
p = 0.9997597157515122
q = 0.0002402842484872624
p + q = 0.9999999999999994
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
b1: sv1 = 1.28247493e-08, sv2 = 3.82920629e-09
b2: sv1 = 1.28247493e-08, sv2 = 3.82920629e-09
b4: sv1 = 1.28247493e-08, sv2 = 3.82920629e-09
b5: sv1 = 1.28247493e-08, sv2 = 3.82920629e-09
c1: sv1 = 3.44467241e-07, sv2 = 9.85854181e-08
c2: sv1 = 3.44467241e-07, sv2 = 9.85854181e-08
c4: sv1 = 3.44467241e-07, sv2 = 9.85854181e-08
c5: sv1 = 5.12288368e-07, sv2 = 2.66507274e-07
c6: sv1 = 5.12288368e-07, sv2 = 2.66507274e-07
d1: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
d2: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
d3: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
d6: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
d8: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09
m1: sv1 = 4.31843137e-07, sv2 = 2.16024561e-07
m2: sv1 = 4.31843137e-07, sv2 = 2.16024561e-07
d9: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09
```

```
In [13]: process_sample_with_del("s24-d9-right-brute")
```

```
=== sum probabilities ===
p = 0.9997597157515122
q = 0.0002402842484872624
p + q = 0.9999999999999994
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.72800000e-12
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 8.63875589e-12
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 6.22030234e-16
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
b1: sv1 = 1.28247493e-08, sv2 = 3.82920629e-09
b2: sv1 = 1.28247493e-08, sv2 = 3.82920629e-09
b4: sv1 = 1.28247493e-08, sv2 = 3.82920629e-09
b5: sv1 = 1.28247493e-08, sv2 = 3.82920629e-09
c1: sv1 = 3.44467241e-07, sv2 = 9.85854181e-08
c2: sv1 = 3.44467241e-07, sv2 = 9.85854181e-08
c4: sv1 = 3.44467241e-07, sv2 = 9.85854181e-08
c5: sv1 = 5.12288368e-07, sv2 = 2.66507274e-07
c6: sv1 = 5.12288368e-07, sv2 = 2.66507274e-07
d1: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
d2: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
d3: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
d6: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
d8: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09
m1: sv1 = 4.31843137e-07, sv2 = 2.16024561e-07
m2: sv1 = 4.31843137e-07, sv2 = 2.16024561e-07
d9: sv1 = 1.89634973e-08, sv2 = 5.77012652e-09
```

1. Надійність незначно збільшилась: 0.99975 проти 0.99973
2. Бачимо суттєву перевагу швидкодії жадібного алгоритму: 1 секунда проти 35. При цьому кінцеве значення надійності є однаковим для обох алгоритмів.

### 3.5 Модифікація 4: 25 елементів (d10)

У лівій частині схеми кількість контролерів типу d є більшою за кількість контролерів типу c на 1. Додамо ще один контролер типу d (d10), щоб права частина схеми також мала різницю між кількістю контролерів c і d рівну 1:



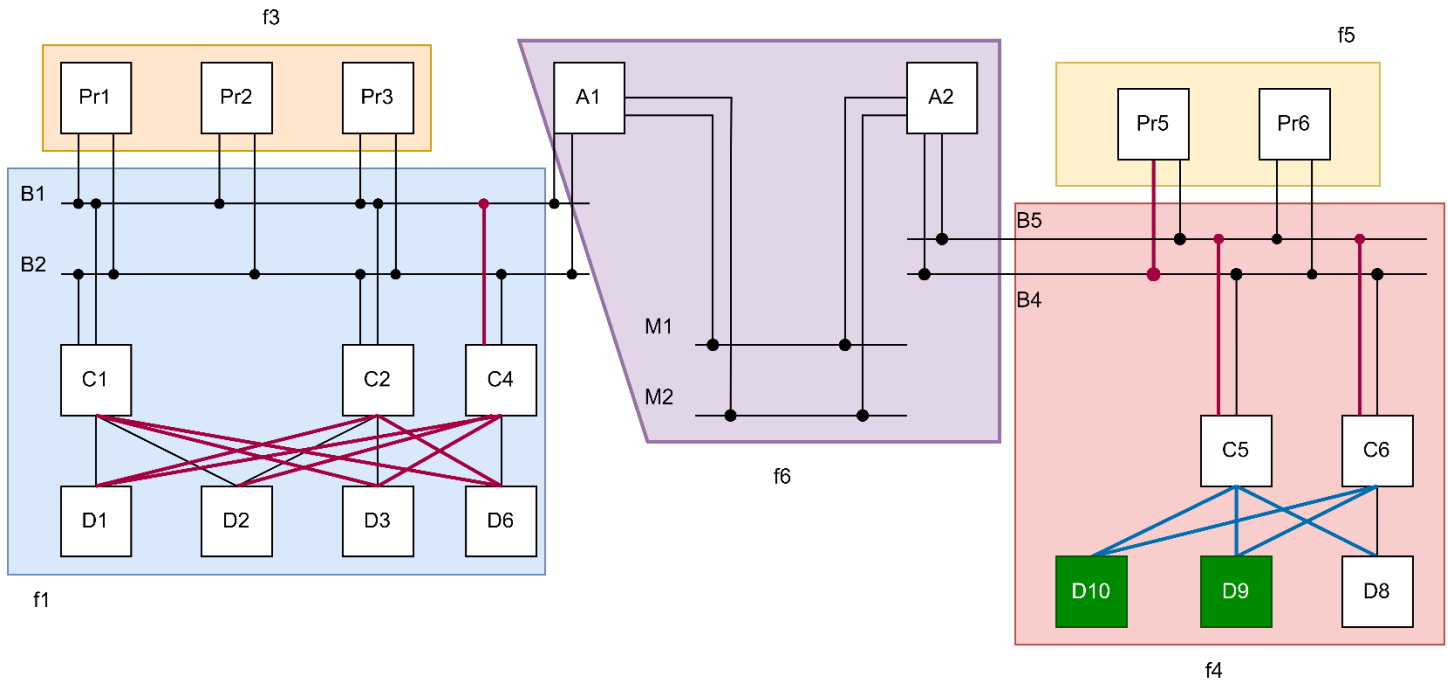


Рис. 9 Схема з новим елементом d10 (всього 25 елементів)

Додавання нового елемента d10 відобразиться на виді логічної функції:

$$f4 = (d8 + d9 + d10) * (c5 + c6) * (b4 + b5)$$

Інші параметри залишимо без змін.

Результати роботи програми:

```

59  === s25 with d9 d10 right ===
60
61  Scheme type = greedy
62  time = 8
63  path = s25-d9-d10-right-greedy
64  sp = 0.9997597162353798, sq = 0.00024028376461419955
65  state count = 33554432
66
67  Scheme type = brute
68  time = 61
69  path = s25-d9-d10-right-brute
70  sp = 0.9997597162353798, sq = 0.00024028376461419955
71  state count = 33554432

```

Метрики:

```
In [14]: process_sample_with_del("s25-d9-d10-right-greedy")
```

```
=== sum probabilities ===
p = 0.999759716235385
q = 0.00024028376461420454
p + q = 0.9999999999999991
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
b1: sv1 = 1.28247421e-08, sv2 = 3.82919903e-09
b2: sv1 = 1.28247421e-08, sv2 = 3.82919903e-09
b4: sv1 = 1.28247421e-08, sv2 = 3.82919903e-09
b5: sv1 = 1.28247421e-08, sv2 = 3.82919903e-09
c1: sv1 = 3.44467043e-07, sv2 = 9.85852197e-08
c2: sv1 = 3.44467043e-07, sv2 = 9.85852197e-08
c4: sv1 = 3.44467043e-07, sv2 = 9.85852197e-08
c5: sv1 = 5.12288170e-07, sv2 = 2.66507076e-07
c6: sv1 = 5.12288170e-07, sv2 = 2.66507076e-07
d1: sv1 = 1.84799038e-08, sv2 = 5.28624282e-09
d2: sv1 = 1.84799038e-08, sv2 = 5.28624282e-09
d3: sv1 = 1.84799038e-08, sv2 = 5.28624282e-09
d6: sv1 = 1.84799038e-08, sv2 = 5.28624282e-09
d8: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
m1: sv1 = 4.31842963e-07, sv2 = 2.16024386e-07
m2: sv1 = 4.31842963e-07, sv2 = 2.16024386e-07
d9: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
d10: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
```

```
In [15]: process_sample_with_del("s25-d9-d10-right-brute")
```

```
=== sum probabilities ===
p = 0.999759716235385
q = 0.00024028376461420454
p + q = 0.9999999999999991
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.72800000e-12
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 8.63875589e-12
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 6.22030234e-16
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
b1: sv1 = 1.28247421e-08, sv2 = 3.82919903e-09
b2: sv1 = 1.28247421e-08, sv2 = 3.82919903e-09
b4: sv1 = 1.28247421e-08, sv2 = 3.82919903e-09
b5: sv1 = 1.28247421e-08, sv2 = 3.82919903e-09
c1: sv1 = 3.44467043e-07, sv2 = 9.85852197e-08
c2: sv1 = 3.44467043e-07, sv2 = 9.85852197e-08
c4: sv1 = 3.44467043e-07, sv2 = 9.85852197e-08
c5: sv1 = 5.12288170e-07, sv2 = 2.66507076e-07
c6: sv1 = 5.12288170e-07, sv2 = 2.66507076e-07
d1: sv1 = 1.84799038e-08, sv2 = 5.28624282e-09
d2: sv1 = 1.84799038e-08, sv2 = 5.28624282e-09
d3: sv1 = 1.84799038e-08, sv2 = 5.28624282e-09
d6: sv1 = 1.84799038e-08, sv2 = 5.28624282e-09
d8: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
m1: sv1 = 4.31842963e-07, sv2 = 2.16024386e-07
m2: sv1 = 4.31842963e-07, sv2 = 2.16024386e-07
d9: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
d10: sv1 = 1.84799145e-08, sv2 = 5.28625347e-09
```

1. Надійність майже не підвищилась: 0.99975971**623** проти 0.99975971**575**.
2. Знову спостерігаємо перевагу швидкодії жадібного алгоритму: 8 секунд проти 61. При цьому кінцеве значення надійності є однаковим для обох алгоритмів.

### 3.6 Модифікація 5: 27 елементів (с7, с8)

Додамо контролери с7 та с8 до правої та лівої частини схеми:

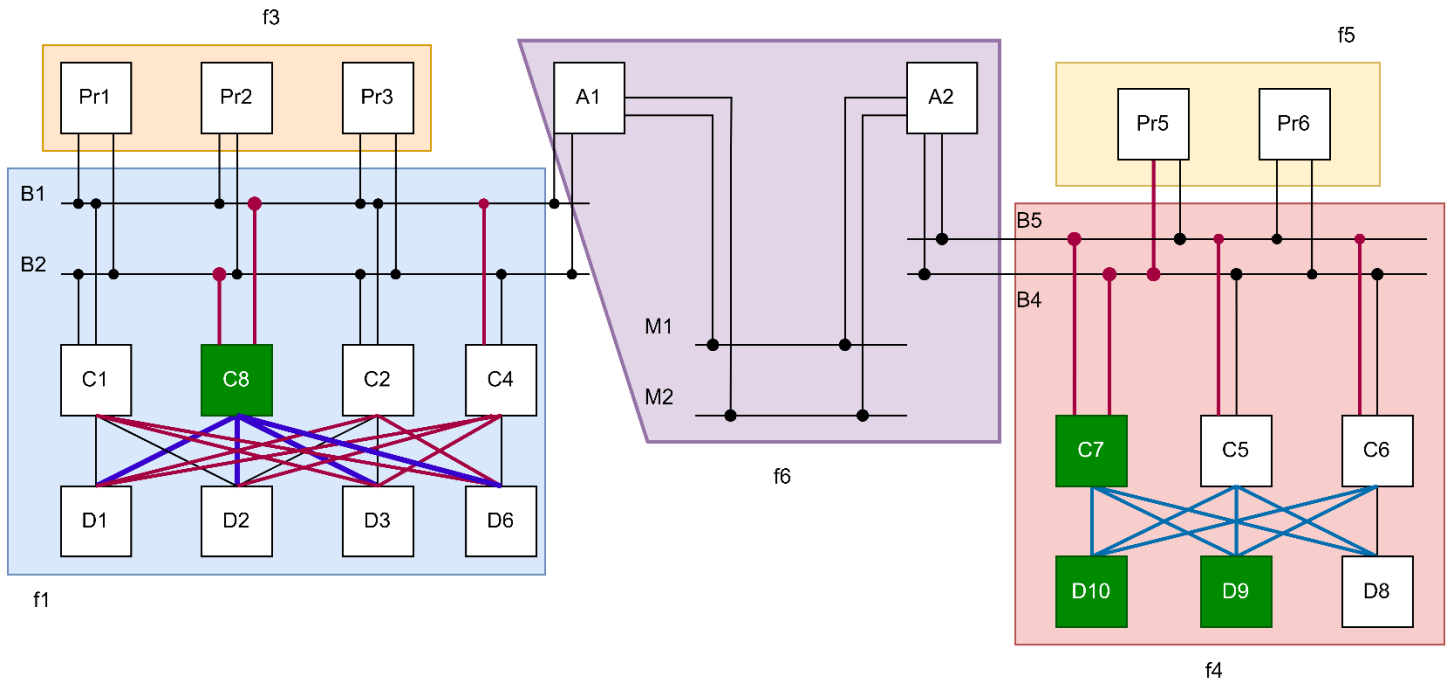


Рис. 10 Схема з елементами c7 та c8 (всього 27 елементів).

Зміни функцій  $f_1$  та  $f_4$ :

$$f_1 = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) * (c_1 + c_8 + c_2 + c_4) * (b_1 + b_2)$$

$$f_4 = (d_8 + d_9 + d_{10}) * (c_5 + c_6) * (b_4 + b_5)$$

Інші параметри залишимо без змін.

Результати роботи програми:

```

73  === s27 with d9 d10 c7 right c8 left ===
74
75  Scheme type = greedy
76  time = 77
77  path = s27-d9-d10-c7-right-c8-left-greedy
78  sp = 0.9997598842949585, sq = 0.00024011570500589362
79  state count = 134217728
80
81  Scheme type = brute
82  time = 220
83  path = s27-d9-d10-c7-right-c8-left-brute
84  sp = 0.9997598842949585, sq = 0.00024011570500589362
85  state count = 134217728

```

Метрики:

```
In [16]: process_sample_with_del("s27-d9-d10-c7-right-c8-left-greedy")
```

```
=== sum probabilities ===
p = 0.9997598842949936
q = 0.00024011570500590327
p + q = 0.9999999999999996
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
b1: sv1 = 1.28222227e-08, sv2 = 3.82667817e-09
b2: sv1 = 1.28222227e-08, sv2 = 3.82667817e-09
b4: sv1 = 1.28222227e-08, sv2 = 3.82667817e-09
b5: sv1 = 1.28222227e-08, sv2 = 3.82667817e-09
c1: sv1 = 3.44329373e-07, sv2 = 9.84474673e-08
c2: sv1 = 3.44329373e-07, sv2 = 9.84474673e-08
c4: sv1 = 3.44329373e-07, sv2 = 9.84474673e-08
c5: sv1 = 3.44398180e-07, sv2 = 9.85163153e-08
c6: sv1 = 3.44398180e-07, sv2 = 9.85163153e-08
d1: sv1 = 1.84762087e-08, sv2 = 5.28254551e-09
d2: sv1 = 1.84762087e-08, sv2 = 5.28254551e-09
d3: sv1 = 1.84762087e-08, sv2 = 5.28254551e-09
d6: sv1 = 1.84762087e-08, sv2 = 5.28254551e-09
d8: sv1 = 1.84762194e-08, sv2 = 5.28255616e-09
m1: sv1 = 4.31782520e-07, sv2 = 2.15963907e-07
m2: sv1 = 4.31782520e-07, sv2 = 2.15963907e-07
d9: sv1 = 1.84762194e-08, sv2 = 5.28255616e-09
d10: sv1 = 1.84762194e-08, sv2 = 5.28255616e-09
c7: sv1 = 3.44398180e-07, sv2 = 9.85163153e-08
c8: sv1 = 3.44329373e-07, sv2 = 9.84474673e-08
```

```
In [17]: process_sample_with_del("s27-d9-d10-c7-right-c8-left-brute")
```

```
=== sum probabilities ===
p = 0.9997598842949936
q = 0.00024011570500590327
p + q = 0.9999999999999996
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.72800000e-12
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 8.63875589e-12
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 6.22030234e-16
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
a1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
a2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.20000000e-04
b1: sv1 = 1.28222227e-08, sv2 = 3.82667817e-09
b2: sv1 = 1.28222227e-08, sv2 = 3.82667817e-09
b4: sv1 = 1.28222227e-08, sv2 = 3.82667817e-09
b5: sv1 = 1.28222227e-08, sv2 = 3.82667817e-09
c1: sv1 = 3.44329373e-07, sv2 = 9.84474673e-08
c2: sv1 = 3.44329373e-07, sv2 = 9.84474673e-08
c4: sv1 = 3.44329373e-07, sv2 = 9.84474673e-08
c5: sv1 = 3.44398180e-07, sv2 = 9.85163153e-08
c6: sv1 = 3.44398180e-07, sv2 = 9.85163153e-08
d1: sv1 = 1.84762087e-08, sv2 = 5.28254551e-09
d2: sv1 = 1.84762087e-08, sv2 = 5.28254551e-09
d3: sv1 = 1.84762087e-08, sv2 = 5.28254551e-09
d6: sv1 = 1.84762087e-08, sv2 = 5.28254551e-09
d8: sv1 = 1.84762194e-08, sv2 = 5.28255616e-09
m1: sv1 = 4.31782520e-07, sv2 = 2.15963907e-07
m2: sv1 = 4.31782520e-07, sv2 = 2.15963907e-07
d9: sv1 = 1.84762194e-08, sv2 = 5.28255616e-09
d10: sv1 = 1.84762194e-08, sv2 = 5.28255616e-09
c7: sv1 = 3.44398180e-07, sv2 = 9.85163153e-08
c8: sv1 = 3.44329373e-07, sv2 = 9.84474673e-08
```

1. Надійність незначно підвищилась: 0.99975988 проти 0.99975971
2. Жадібний алгоритм очікувано швидший: 77 секунд проти 220

### 3.7 Модифікація 6: 29 елементів (a3, a4)

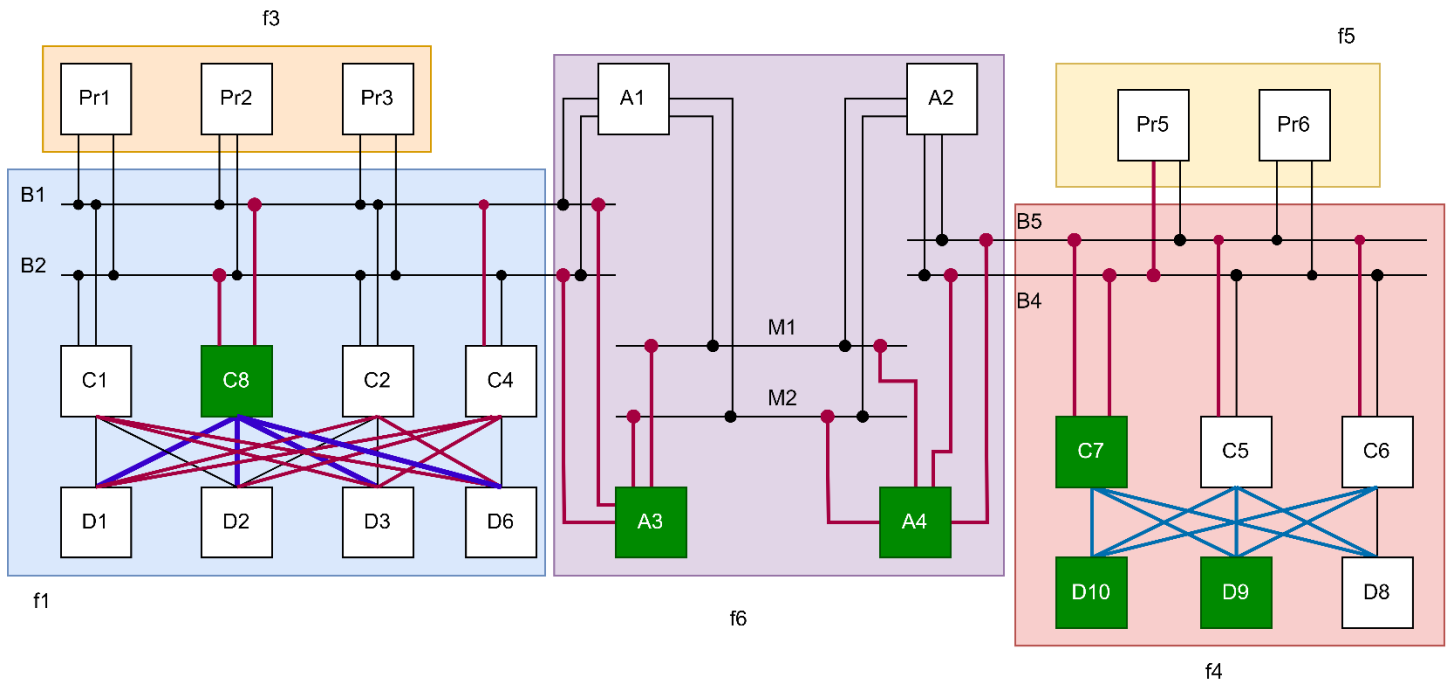


Рис. 11 Схема з елементами a3, a4 (всього 29 елементів)

Жодна із змін не впливала на контролери типу а. Саме контролери типу а, згідно метрик, є головною причиною відмови всієї схеми. Додамо 2 контролери: а3 та а4. Тепер права та ліва частини схеми мають декілька з'єднань з магістралями m1, m2.

Логічна функція прийме вид:

$$f1 = (d1 + d2 + d3 + d4) * (c1 + c8 + c2 + c4) * (b1 + b2)$$

$$f3 = pr1 * pr2 * pr3$$

$$f4 = (d10 + d9 + d8) * (c7 + c5 + c6) * (b4 + b5)$$

$$f5 = pr5 * pr6$$

$$f6 = (a1 + a3) * (a2 + a4) * (m1 + m2)$$

Інші параметри залишило без змін.

Результати роботи програми:

```
87  === s29 with d9 d10 c7 right c8 left a4 ===
88
89  Scheme type = greedy
90  time = 397
91  path = s29-d9-d10-c7-right-c8-left-a4-greedy
92  sp = 0.999999841063663, sq = 1.5893623277066473e-07
93  state count = 536870912
94
95  Scheme type = brute
96  time = 1022
97  path = s29-d9-d10-c7-right-c8-left-a4-brute
98  sp = 0.999999841063663, sq = 1.5893623277066473e-07
99  state count = 536870912
```

Метрики:

In [18]: process\_sample\_with\_del("s29-d9-d10-c7-right-c8-left-a4-greedy")

```
=== sum probabilities ===
p = 0.9999998410637558
q = 1.5893623277071066e-07
p + q = 0.999999999999886
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
a1: sv1 = 8.63914139e-08, sv2 = 1.44173423e-08
a2: sv1 = 8.63914139e-08, sv2 = 1.44173423e-08
b1: sv1 = 9.22508424e-09, sv2 = 2.27380633e-10
b2: sv1 = 9.22508424e-09, sv2 = 2.27380633e-10
b4: sv1 = 9.22508424e-09, sv2 = 2.27380633e-10
b5: sv1 = 9.22508424e-09, sv2 = 2.27380633e-10
c1: sv1 = 2.46006113e-07, sv2 = 6.51921015e-11
c2: sv1 = 2.46006113e-07, sv2 = 6.51921015e-11
c4: sv1 = 2.46006113e-07, sv2 = 6.51921015e-11
c5: sv1 = 2.46074936e-07, sv2 = 1.34056587e-10
c6: sv1 = 2.46074936e-07, sv2 = 1.34056587e-10
d1: sv1 = 1.32003265e-08, sv2 = 3.49659736e-12
d2: sv1 = 1.32003265e-08, sv2 = 3.49659736e-12
d3: sv1 = 1.32003265e-08, sv2 = 3.49659736e-12
d6: sv1 = 1.32003265e-08, sv2 = 3.49659736e-12
d8: sv1 = 1.32003371e-08, sv2 = 3.50724489e-12
m1: sv1 = 3.45480970e-07, sv2 = 1.29610557e-07
m2: sv1 = 3.45480970e-07, sv2 = 1.29610557e-07
d9: sv1 = 1.32003371e-08, sv2 = 3.50724489e-12
d10: sv1 = 1.32003371e-08, sv2 = 3.50724489e-12
c7: sv1 = 2.46074936e-07, sv2 = 1.34056587e-10
c8: sv1 = 2.46006113e-07, sv2 = 6.51921015e-11
a3: sv1 = 8.63914139e-08, sv2 = 1.44173423e-08
a4: sv1 = 8.63914139e-08, sv2 = 1.44173423e-08
```

In [19]: process\_sample\_with\_del("s29-d9-d10-c7-right-c8-left-a4-brute")

```
=== sum probabilities ===
p = 0.9999998410637558
q = 1.5893623277071066e-07
p + q = 0.999999999999886
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.72800000e-12
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 8.63875589e-12
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 6.22030234e-16
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
a1: sv1 = 8.63914139e-08, sv2 = 1.44173423e-08
a2: sv1 = 8.63914139e-08, sv2 = 1.44173423e-08
b1: sv1 = 9.22508424e-09, sv2 = 2.27380633e-10
b2: sv1 = 9.22508424e-09, sv2 = 2.27380633e-10
b4: sv1 = 9.22508424e-09, sv2 = 2.27380633e-10
b5: sv1 = 9.22508424e-09, sv2 = 2.27380633e-10
c1: sv1 = 2.46006113e-07, sv2 = 6.51921015e-11
c2: sv1 = 2.46006113e-07, sv2 = 6.51921015e-11
c4: sv1 = 2.46006113e-07, sv2 = 6.51921015e-11
c5: sv1 = 2.46074936e-07, sv2 = 1.34056587e-10
c6: sv1 = 2.46074936e-07, sv2 = 1.34056587e-10
d1: sv1 = 1.32003265e-08, sv2 = 3.49659736e-12
d2: sv1 = 1.32003265e-08, sv2 = 3.49659736e-12
d3: sv1 = 1.32003265e-08, sv2 = 3.49659736e-12
d6: sv1 = 1.32003265e-08, sv2 = 3.49659736e-12
d8: sv1 = 1.32003371e-08, sv2 = 3.50724489e-12
m1: sv1 = 3.45480970e-07, sv2 = 1.29610557e-07
m2: sv1 = 3.45480970e-07, sv2 = 1.29610557e-07
d9: sv1 = 1.32003371e-08, sv2 = 3.50724489e-12
d10: sv1 = 1.32003371e-08, sv2 = 3.50724489e-12
c7: sv1 = 2.46074936e-07, sv2 = 1.34056587e-10
c8: sv1 = 2.46006113e-07, sv2 = 6.51921015e-11
a3: sv1 = 8.63914139e-08, sv2 = 1.44173423e-08
a4: sv1 = 8.63914139e-08, sv2 = 1.44173423e-08
```

1. Спостерігаємо значний приріст надійності: 0.9999998 проти 0.99975. Початкова мета: досягнути надійності, більшої або рівної 0.9999 – досягнута.
2. Імовірність відмов контролерів типу а зменшилась з четвертого до восьмого порядку.
3. Вкотре жадібний алгоритм знаходить варіанти реконфігурацій, які дозволяють досягати кінцевою надійності, ідентичної до повного перебору, за значно менший час.

## 4. Додаткове тестування швидкодії

Обчислення розділу 3 проводились на EC2 vm. Однією з помилок налаштування vm було використання мережевих дисків (EBS volumes). Через це результати порівняння швидкодії було спотворено потенційним впливом продуктивності мереж.

Незначний приріст надійності для модифікацій 4, 5 на кінцеву надійність системи, та суттєвий приріст надійності внаслідок додавання контролерів a3, a4, наводить на думку, що можна отримати надійність, схожу з модифікацією 6, не застосовуючи модифікації 4, 5:

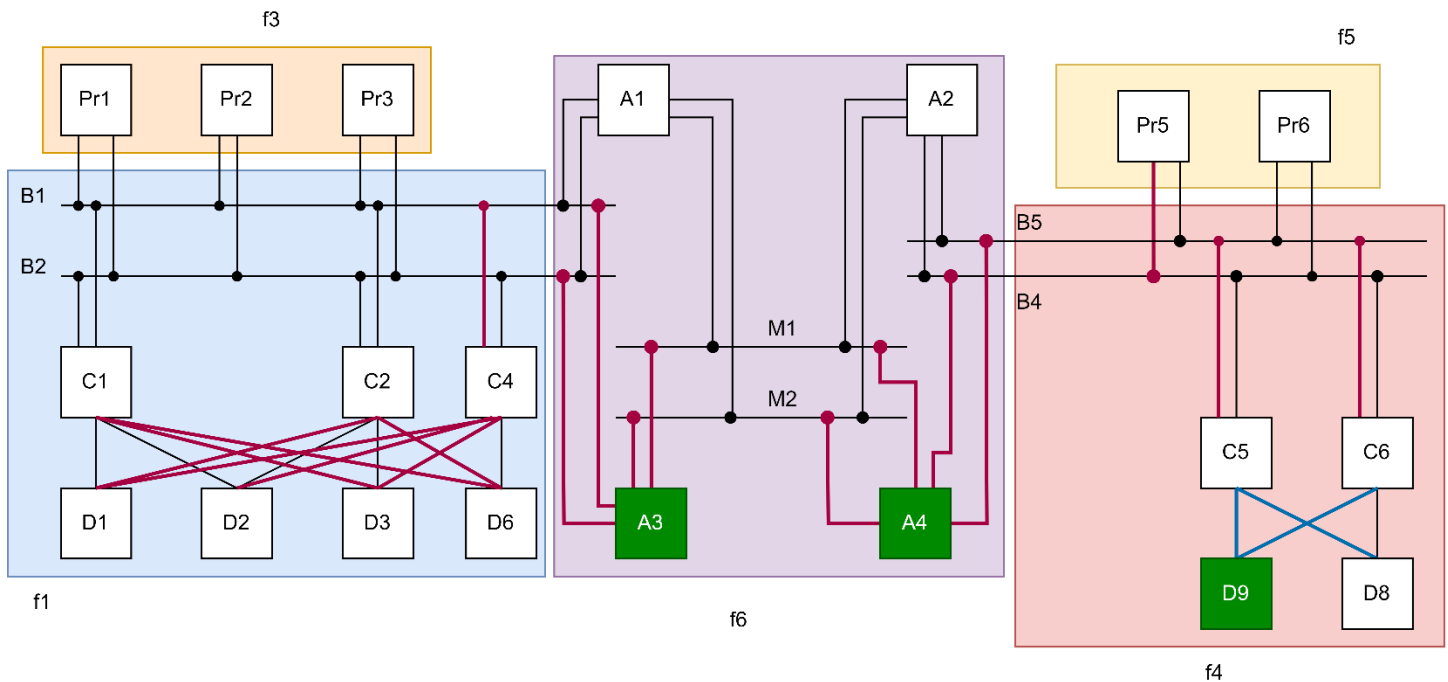


Рис.12 Модифікація 7 (26 елементів)

Логічна функція схеми:

$$f1 = (d1 + d2 + d3 + d4) * (c1 + c2 + c4) * (b1 + b2)$$

$$f3 = pr1 * pr2 * pr3$$

$$f4 = (d9 + d8) * (c5 + c6) * (b4 + b5)$$

$$f5 = pr5 * pr6$$

$$f6 = (a1 + a3) * (a2 + a4) * (m1 + m2)$$

Опис схеми в коді:

```
constexpr size_t all_count { 26 };
constexpr size_t processor_count { 5 };

SchemeDto<all_count, processor_count> scheme
{
    .elements =
    {
```

```

    ElementDto { .name = "a1", .p = ppa, .q = qpa },
    ElementDto { .name = "a2", .p = ppa, .q = qpa },
    ElementDto { .name = "b1", .p = ppb, .q = qpb },
    ElementDto { .name = "b2", .p = ppb, .q = qpb },
    ElementDto { .name = "b4", .p = ppb, .q = qpb },
    ElementDto { .name = "b5", .p = ppb, .q = qpb },
    ElementDto { .name = "c1", .p = ppc, .q = qpc },
    ElementDto { .name = "c2", .p = ppc, .q = qpc },
    ElementDto { .name = "c4", .p = ppc, .q = qpc },
    ElementDto { .name = "c5", .p = ppc, .q = qpc },
    ElementDto { .name = "c6", .p = ppc, .q = qpc },
    ElementDto { .name = "d1", .p = ppd, .q = qpd },
    ElementDto { .name = "d2", .p = ppd, .q = qpd },
    ElementDto { .name = "d3", .p = ppd, .q = qpd },
    ElementDto { .name = "d6", .p = ppd, .q = qpd },
    ElementDto { .name = "d8", .p = ppd, .q = qpd },
    ElementDto { .name = "m1", .p = ppm, .q = qpm },
    ElementDto { .name = "m2", .p = ppm, .q = qpm },
    ElementDto { .name = "d9", .p = ppd, .q = qpd },
    ElementDto { .name = "a3", .p = ppa, .q = qpa },
    ElementDto { .name = "a4", .p = ppa, .q = qpa }
},

.processors =
{
    ProcessorDto
    {
        .name = "pr1", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 50, .max_load = 100,
        .transitions =
        {
            { TrUnit { 1, 50 } },
            { TrUnit { 2, 50 } },
            { TrUnit { 1, 25 }, TrUnit { 2, 25 } },
            { TrUnit { 1, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
            { TrUnit { 1, 25 }, TrUnit { 4, 30 } },
            { TrUnit { 2, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
            { TrUnit { 2, 25 }, TrUnit { 4, 30 } }
        }
    },
    ProcessorDto
    {
        .name = "pr2", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 50, .max_load = 100,
        .transitions =
        {
            { TrUnit { 0, 50 } },
            { TrUnit { 2, 50 } },
            { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 2, 25 } },
            { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
            { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 4, 30 } },

```



```

        { TrUnit { 2, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
        { TrUnit { 2, 25 }, TrUnit { 4, 30 } }
    }
},
ProcessorDto
{
    .name = "pr3", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 50, .max_load = 100,
    .transitions =
    {
        { TrUnit { 0, 50 } },
        { TrUnit { 1, 50 } },
        { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 1, 25 } },
        { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
        { TrUnit { 0, 25 }, TrUnit { 4, 30 } },
        { TrUnit { 1, 25 }, TrUnit { 3, 30 } },
        { TrUnit { 1, 25 }, TrUnit { 4, 30 } }
    }
},
ProcessorDto
{
    .name = "pr4", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 30, .max_load = 60,
    .transitions =
    {
        { TrUnit { 4, 30 } },
        { TrUnit { 0, 35 } },
        { TrUnit { 1, 35 } },
        { TrUnit { 2, 35 } },
        { TrUnit { 0, 18 }, TrUnit { 1, 18 } },
        { TrUnit { 1, 18 }, TrUnit { 2, 18 } },
        { TrUnit { 0, 18 }, TrUnit { 2, 18 } },
        { TrUnit { 0, 12 }, TrUnit { 1, 12 }, TrUnit { 2, 12 } }
    }
},
ProcessorDto
{
    .name = "pr5", .p = ppr, .q = qpr, .normal_load = 30, .max_load = 60,
    .transitions =
    {
        { TrUnit { 3, 30 } },
        { TrUnit { 0, 35 } },
        { TrUnit { 1, 35 } },
        { TrUnit { 2, 35 } },
        { TrUnit { 0, 18 }, TrUnit { 1, 18 } },
        { TrUnit { 1, 18 }, TrUnit { 2, 18 } },
        { TrUnit { 0, 18 }, TrUnit { 2, 18 } },
        { TrUnit { 0, 12 }, TrUnit { 1, 12 }, TrUnit { 2, 12 } }
    }
}
}

```

```

},

.scheme_function = [](const StateVectorDto<all_count, processor_count>& sv)
{
    span<bool> s = sv.all;

    bool f1 = (s[16] + s[17] + s[18] + s[19]) * (s[11] + s[12] + s[13]) * (s[7] + s[8]);
    bool f3 = s[0] * s[1] * s[2];
    bool f4 = (s[20] + s[23]) * (s[14] + s[15]) * (s[9] + s[10]);
    bool f5 = s[3] * s[4];
    bool f6 = (s[5] + s[24]) * (s[6] + s[25]) * (s[21] + s[22]);

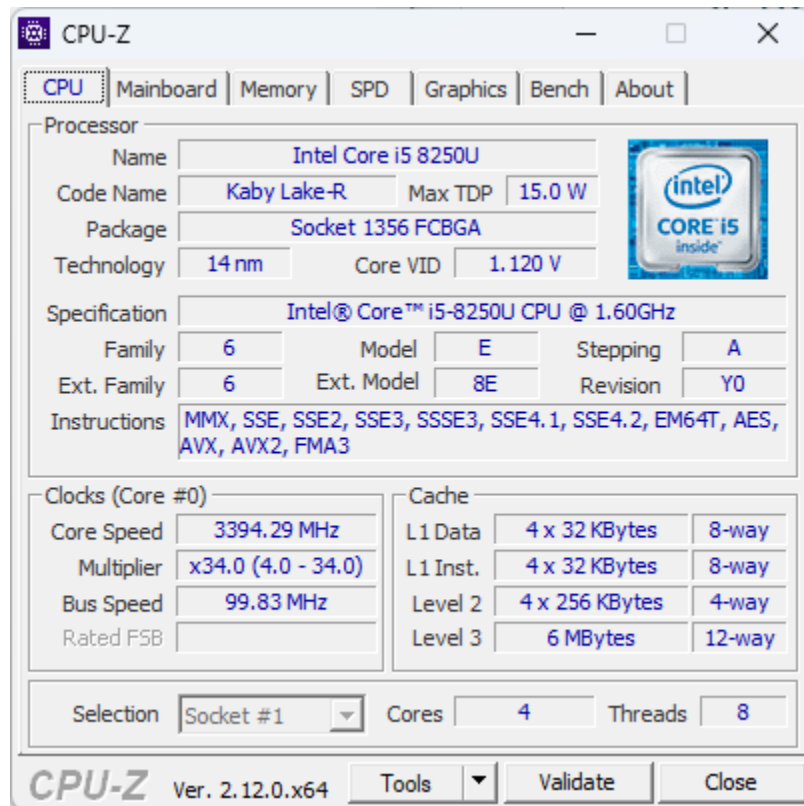
    return f1 * f3 * f4 * f5 * f6;
}
};

scheme.scheme_name = "s26-final-greedy";
scheme.type = SchemeType::Greedy;
Utils::process_scheme(scheme);

scheme.scheme_name = "s26-final-brute";
scheme.type = SchemeType::Brute;
Utils::process_scheme(scheme);
}

```

Для додаткового тестування швидкодії виконаємо обчислення для оригінальної схеми, модифікацій 1, 2, 3, 7. Обчислення здійснюватимемо на процесорі:



## Результати виконання програми:

```
PS C:\Users\Bohdan\Programming\labs-5-1\SchemeReliability\x64\Release> .\sr-research.exe

=== original s23 ===

Scheme type = greedy
time = 4
path = s23-original-greedy
sp = 0.9990208569798784, sq = 0.0009791430201189963
state count = 8388608

Scheme type = brute
time = 3
path = s23-original-brute
sp = 0.9990208569798784, sq = 0.0009791430201189963
state count = 8388608

=== s23 with rt (7 7 7 8 8) ===

Scheme type = greedy
time = 9
path = s23-77788-greedy
sp = 0.9992607082975018, sq = 0.0007392917024915111
state count = 8388608

Scheme type = brute
time = 157
path = s23-77788-brute
sp = 0.9992607082975018, sq = 0.0007392917024915111
state count = 8388608

=== s23 with rt and modified connections ===

Scheme type = greedy
time = 10
path = s23-77788-modified-connections-greedy
sp = 0.9997377215216205, sq = 0.00026227847836073244
state count = 8388608

Scheme type = brute
time = 182
path = s23-77788-modified-connections-brute
sp = 0.9997377215216205, sq = 0.00026227847836073244
state count = 8388608

=== s24 with d9 right ===

Scheme type = greedy
time = 21
path = s24-d9-right-greedy
sp = 0.9997597157514958, sq = 0.00024028424848725245
state count = 16777216

Scheme type = brute
time = 308
path = s24-d9-right-brute
sp = 0.9997597157514958, sq = 0.00024028424848725245
state count = 16777216

=== s26 final ===

Scheme type = greedy
time = 106
path = s26-final-greedy
sp = 0.9999996724797207, sq = 3.2752016698960673e-07
state count = 67108864

Scheme type = brute
time = 1261
path = s26-final-brute
sp = 0.9999996724797207, sq = 3.2752016698960673e-07
state count = 67108864
PS C:\Users\Bohdan\Programming\labs-5-1\SchemeReliability\x64\Release> |
```

Додатково обчислимо метрики для модифікації 7:

```
process_sample_with_del("s26-final-greedy")
[5] ✓ 1m 42.6s
...
=== sum probabilities ===
p = 0.9999996724798291
q = 3.2752016698965956e-07
p + q = 0.9999999999999961
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.38217191e-11
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.55488898e-11
a1: sv1 = 8.64116295e-08, sv2 = 1.44375699e-08
a2: sv1 = 8.64116295e-08, sv2 = 1.44375699e-08
b1: sv1 = 9.22761144e-09, sv2 = 2.29909354e-10
b2: sv1 = 9.22761144e-09, sv2 = 2.29909354e-10
b4: sv1 = 9.22761144e-09, sv2 = 2.29909354e-10
b5: sv1 = 9.22761144e-09, sv2 = 2.29909354e-10
c1: sv1 = 2.46144014e-07, sv2 = 2.03175988e-10
c2: sv1 = 2.46144014e-07, sv2 = 2.03175988e-10
c4: sv1 = 2.46144014e-07, sv2 = 2.03175988e-10
c5: sv1 = 4.14005421e-07, sv2 = 1.68165335e-07
c6: sv1 = 4.14005421e-07, sv2 = 1.68165335e-07
d1: sv1 = 1.32040331e-08, sv2 = 7.20544391e-12
d2: sv1 = 1.32040331e-08, sv2 = 7.20544391e-12
d3: sv1 = 1.32040331e-08, sv2 = 7.20544391e-12
d6: sv1 = 1.32040331e-08, sv2 = 7.20544391e-12
d8: sv1 = 1.36877320e-08, sv2 = 4.91194637e-10
m1: sv1 = 3.45541602e-07, sv2 = 1.29671226e-07
m2: sv1 = 3.45541602e-07, sv2 = 1.29671226e-07
d9: sv1 = 1.36877320e-08, sv2 = 4.91194637e-10
a3: sv1 = 8.64116295e-08, sv2 = 1.44375699e-08
a4: sv1 = 8.64116295e-08, sv2 = 1.44375699e-08
```

```
process_sample_with_del("s26-final-brute")
[6] ✓ 1m 30.8s
...
=== sum probabilities ===
p = 0.9999996724798291
q = 3.2752016698965956e-07
p + q = 0.9999999999999961
=== reconfiguration is consistent ===
=== sum fail probability(sv1 | sv2) per element ===
pr1: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 1.72800000e-12
pr2: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 8.63875589e-12
pr3: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
pr4: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 6.22030234e-16
pr5: sv1 = 1.20000000e-04, sv2 = 5.18337794e-12
a1: sv1 = 8.64116295e-08, sv2 = 1.44375699e-08
a2: sv1 = 8.64116295e-08, sv2 = 1.44375699e-08
b1: sv1 = 9.22761144e-09, sv2 = 2.29909354e-10
b2: sv1 = 9.22761144e-09, sv2 = 2.29909354e-10
b4: sv1 = 9.22761144e-09, sv2 = 2.29909354e-10
b5: sv1 = 9.22761144e-09, sv2 = 2.29909354e-10
c1: sv1 = 2.46144014e-07, sv2 = 2.03175988e-10
c2: sv1 = 2.46144014e-07, sv2 = 2.03175988e-10
c4: sv1 = 2.46144014e-07, sv2 = 2.03175988e-10
c5: sv1 = 4.14005421e-07, sv2 = 1.68165335e-07
c6: sv1 = 4.14005421e-07, sv2 = 1.68165335e-07
d1: sv1 = 1.32040331e-08, sv2 = 7.20544391e-12
d2: sv1 = 1.32040331e-08, sv2 = 7.20544391e-12
d3: sv1 = 1.32040331e-08, sv2 = 7.20544391e-12
d6: sv1 = 1.32040331e-08, sv2 = 7.20544391e-12
d8: sv1 = 1.36877320e-08, sv2 = 4.91194637e-10
m1: sv1 = 3.45541602e-07, sv2 = 1.29671226e-07
m2: sv1 = 3.45541602e-07, sv2 = 1.29671226e-07
d9: sv1 = 1.36877320e-08, sv2 = 4.91194637e-10
a3: sv1 = 8.64116295e-08, sv2 = 1.44375699e-08
a4: sv1 = 8.64116295e-08, sv2 = 1.44375699e-08
```

1. Різниця у швидкодії жадібного алгоритму та повного обходу стає ще більш очевидною.
2. Надійність модифікації 7 майже не поступається надійності модифікації 6. При цьому схема 7 має на 3 елементи менше ніж схема 6.