

**Наукова робота на конкурс за напрямом:
Комп'ютерні науки**

на тему:

«Моделювання людино-машинної взаємодії в АСУ з урахуванням
можливості виникнення і усунення помилок різних типів»

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Аналіз методів моделювання людини-оператора в автоматизованих системах ...	5
1.1 Методи опису і оцінки процесів людино-машинної взаємодії	5
1.2 Методологія розробки математичних моделей для типових функціональних структур людино-машинної взаємодії.....	7
1.3 Висновки з розділу 1	11
2 Розробка моделей і інформаційної технології для оцінювання надійності операторської діяльності з урахуванням помилок різних типів	12
2.1 Розробка принципів моделювання	12
2.2 Приклад розробки моделей для типових функціональних структур	14
2.2.1 Модель оцінки надійності діяльності оператора для типової функціональної структури «Робоча операція з контролем функціонування».....	14
2.2.2 Модель оцінки надійності діяльності оператора для типової функціональної структури «Робоча операція з контролем функціонування, доопрацюванням і повторенням робочої операції»	24
2.3 Комп'ютерне моделювання процесів виникнення і усунення помилок людини-оператора.....	24
2.4 Висновки з розділу 2	27
Висновки	28
Список літератури	29
Додаток А. Порівняльний аналіз методів опису і оцінки процесів функціонування людинно-машинних систем	31
Додаток Б. Типові функціональні одиниці.....	38
Додаток В. Типові функціональні структури для опису діяльності оператора.....	39
Додаток Г. Розроблення моделі для ТФС «Робоча операція з контролем функціонування, доопрацюванням і повторенням робочої операції».....	42

ВСТУП

Актуальність. Від 50 до 80% аварій в автоматизованих системах управління пов'язані з проблемою так званого «людського фактору». Існує велика кількість моделей оцінювання оптимізації людино-машинної взаємодії в АСУ, але, на жаль, ці моделі орієнтовані на урахування можливості виникнення помилок лише одного типу. В зв'язку з можливістю в реальних системах наявності різноманітних помилок існує гостра необхідність розробки моделей та інформаційної технології оцінювання надійності людино-машинної взаємодії в АСУ з урахуванням можливості виникнення і усунення помилок різних типів.

Об'єкт дослідження. Людино-машинна взаємодія в АСУ.

Предмет дослідження. Оцінювання надійності людино-машинної взаємодії з урахуванням помилок різних типів.

Мета: Розробити математичні моделі і інформаційну технологію для моделювання надійності людино-машинної взаємодії в АСУ з урахуванням можливості виникнення і усунення помилок різних типів.

Робота складається з двох розділів, висновку, списку літератури, чотирьох додатків, включає 30 сторінок, 10 рисунків, 20 літературних джерел.

Публікації. За матеріалами дослідження опубліковані 3 наукові роботи. Список робіт та копії публікацій додаються.

Апробація. Результати доповідались на трьох наукових конференціях:

- Міжнародна науково-практична конференція UNITECH'17, м. Габрово, 18 листопада 2017р.
- Науково-практична конференція «Цифрові технології в освіті, науці, суспільстві», м Петрозаводськ, 30 листопада 2017р.

- Науково-практична конференція «Цифрові технології в освіті, науці, суспільстві», м Петрозаводськ, 6 грудня 2018р.

Впровадження. Результати впроваджено:

- у навчальний процес Сумського державного університету
- у виробничий процес сервісного центру «СумиТехСервіс» ФОП Полунов

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Методи опису і оцінки процесів людино-машинної взаємодії

У зв'язку з бурхливим розвитком автоматизованих систем збільшуються ризику і збитки від помилок людини-оператора [1-5]. Для опису людино-машинних систем (ЛМС) з урахуванням "людського фактору" в даний час використовується широкий спектр наук [6-10]. Процеси функціонування ЛМС можуть бути описані за допомогою формальних систем [11-14]:

- логічні системи (формальні граматики, мережі Петрі і ін.);
- алгебраїчні системи (марковські і напівмарковські процеси, напівмарковські мережі обслуговування та ін.);
- мовно-алгебраїчні системи (мережі передування, PERT, GERT, МКП мережі, функціональні мережі).

Порівняльний аналіз методів опису і оцінки процесів функціонування ЛМС наведено в додатку А.

Розроблені в функціонально-структурній теорії професора Губинського А.І. [15,16] методики оцінки показників ефективності, якості і надійності є універсальними для широкого класу ергатичних систем, що допускають опис їх функціонування у вигляді дискретних кінцевих алгоритмів, відповідних схем алгоритмів.

Подання алгоритмів здійснюється у вигляді сукупності спеціально введених типових функціональних одиниць (ТФО), що складають основу алгоритмічної мови типових структур (АМТС). Перелік основних ТФО наведені в додатку Б. Обчислення показників ефективності, якості і надійності проводиться за допомогою формул, наведених для комбінацій, які зустрічаються найбільш часто.

Показники якості функціонування (час виконання функції і ін.) і показники функціональної надійності (ймовірність безпомилкового виконання функції,

ймовірність своєчасного виконання функції) обчислюються для кожної функції (цілі, завдання, операції) ергатичної системи. Показники ефективності (дохід від виконання функції і ін.) - як для окремої функції, так і для ергатичної системи в цілому.

При оцінці показників ефективності, якості і надійності ергатичних систем беруться до уваги три групи показників.

Група результуючих показників, які є результатом розрахунку і служать оціночними для ергатичної системи в цілому або окремої функції:

π - ймовірність безпомилкового виконання функції;

θ - ймовірність своєчасного виконання функції;

φ - ймовірність правильного безпомилкового і своєчасного виконання функції;

T - час виконання функції;

U - дохід, отриманий від виконання функції;

Група вихідних показників, які відносяться до конкретної 1-ї операції, що входить до складу функції, і на основі яких здійснюються обчислення результуючих показників, визначаються експериментально.

β_i - ймовірність безпомилкового (або помилкового) виконання i -ї операції;

T_i - час виконання i -ї операції;

r_i - дохід, одержуваний від виконання i -ї операції.

Група проміжних показників, що з'являється в процесі виконання розрахунків показників для типових груп операцій (типових функціональних структур) по редукції [12,17,18]:

β_s - еквівалентна ймовірність безпомилкового (або помилкового) виконання, яка відповідає типовій функціональній структурі (ТФС);

T_s - еквівалентний час виконання типової функціональної структури;

U_s - еквівалентний дохід, який відповідає типовій функціональній структурі.

Для ТФС, що мають цикли (повтори однієї або декількох операцій, що входять в типову функціональну структуру), при розрахунках доводиться вводити ряд їх модифікацій:

а) накопичені ймовірності - для випадку, коли число циклів фіксоване [дорівнює l незалежно від результатів кожного циклу: $\beta_s(l), T_s(l), U_s(l)$];

б) фінальні ймовірності (випадки «а» при $l = \infty$): $\beta_s(\infty), T_s(\infty), U_s(\infty)$

в) середні від циклів ймовірності - для випадку, коли граничне число циклів обмежене (дорівнює m), а закінчення повторення відбувається при першому ж виході, визнаному вдалим: $M[\beta_s(m)]$ і $D[\beta_s(m)]$, $M[T_s(m)]$, і $D[T_s(m)]$, $M[U_s(m)]$ і $D[U_s(m)]$. ТФС наведені в додатку В.

1.2 Методологія розробки математичних моделей для типових функціональних структур людино-машинної взаємодії

В основі отримання кінцевого набору формул для безлічі ТФС лежить процедура переходу від "графа робіт", відповідного ТФС, до "графу подій" [12,16] (рис. 1.1). Тут "1" і "2" - поглинаючі вершини, що відповідають станам: "1" – безпомилкове виконання алгоритму функціонування (АФ); "2" - виконання АФ з помилкою; "3" - початкова вершина графа подій; "4" і "5" - проміжні вершини.

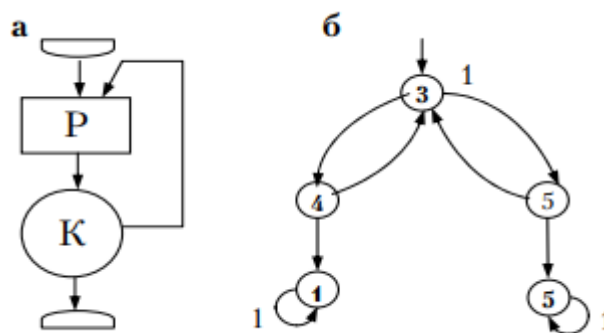


Рисунок 1.1 – ТФС «Робоча – контроль функціонування». Граф робіт (а), граф подій (б).

Розглянемо цю технологію, розроблену [12,16] для випадку бінарних моделей помилок, з метою подальшого розвитку на випадок врахування можливості помилок різних типів.

Інформація, необхідна і достатня для побудови моделей оцінки АФ людино-машинних систем, може бути задана на імовірнісному графі $G(X, Z)$, вершини якого (X - безліч вершин) відповідають подіям початку і закінчення виконуваних операцій, а дуги - можливим переходам (Z - множина дуг).

Завдання аналізу алгоритму функціонування ЛМС, заданого на імовірнісному графі $G(X, Z)$, зводиться до перетворення типу

$$G(X, Z) \rightarrow G(X^*, Z^*),$$

де $G(X^*, Z^*)$ - збільшений імовірнісний граф, в якому проміжні вершини відсутні; ваги дуг, спрямованих з початкової вершини, яка відповідає прийняттю рішення про початок процесу функціонування, в поглинаючі вершини, представлені у вигляді функціональних залежностей від ваг дуг вихідного графа $G(X, Z)$, що дозволяє обчислювати ймовірності і витрати, пов'язані з переходами з початкової в поглинаючі вершини.

В основі методу збільшення імовірнісних графів лежить поняття Н-функції [12,19]. Нехай $G(X, Z)$ - імовірнісний граф. Для кожної його дуги $(i, j) \in Z$, $i \in X$, $j \in X$ поставимо значення ненульової ймовірності p_{ij} переходу $i \rightarrow j$, яка відповідає рівню правильності (безпомилковості) виконання деякого елемента процесу функціонування. При цьому $\sum_j p_{ij} = 1$ для всіх $i \in X$. Для кожної дуги $(i, j) \in Z$ поставимо у відповідність випадкову величину t_{ij} витрат (часу, вартості), пов'язаних з переходом $i \rightarrow j$. Величина t_{ij} характеризується функцією розподілу $F_{ij}(t)$ з щільністю $f_{ij}(t)$, математичним очікуванням M_{ij} і дисперсією D_{ij} . Вважається, що випадкові величини t_{ij} є незалежними для всіх дуг $(i, j) \in Z$.

Н-функцією дуги $(i, j) \in Z$ називається величина, яка визначається наступним чином:

$$H_{ij}(S) = p_{ij}L[F_{ij}(t)], \quad (1)$$

де L - умовне позначення застосування оператора Лапласа до функції розподілу $F_{ij}(t)$:

$$L[F_{ij}(t)] = \int_0^{\infty} e^{-st} dF_{ij}(t)$$

Знаючи Н-функцію, отримуємо

$$p_{ij} = H_{ij}(s) |_{s=0}; \quad (2)$$

$$M_{ij} = -\frac{1}{p_{ij}} \frac{d}{ds} H_{ij}(s) |_{s=0}; \quad (3)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{p_{ij}} \frac{d^2}{ds^2} [H_{ij}(s)] |_{s=0} - (M_{ij})^2; \quad (4)$$

$$F_{ij}(t) = \frac{1}{p_{ij}} L^{-1}[H_{ij}(s)], \quad (5)$$

де L^{-1} - умовне позначення зворотного перетворення Лапласа.

Наприклад, для типової функціональної структури "робоча - контроль функціонування" без обмеження на допустиму кількість циклів контролю $m = \infty$, граф робіт, якій зображений на рис. 1.1,а, а граф подій - на рис. 1.1,б, зменшення розмірності графа зображується схемою на рис. 1.2,а,б,в. Розмірність графа скорочується за рахунок транзитивних вершин 4 і 5 (рис. 1.1,б), при видаленні яких утворюються однорідні петлі при вершині 3 (рис. 1.2,а,б). Видаляючи необмежені петлі при вершині 3, отримаємо збільшений граф, що не містить проміжних вершин (рис. 1.2,в). Вирази для Н-функцій початкового і еквівалентних графів наводяться нижче.

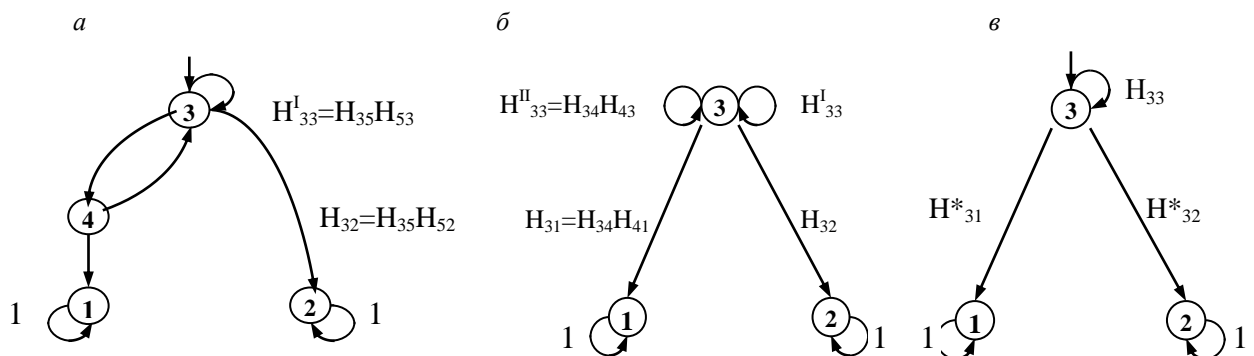


Рисунок 1.2 – Схема зменшення розмірності графа (для ТФС рис. 1.1).

Правила, що дозволяють знаходити Н-функцію дуг збільшеного графа $G(X^*, Z^*)$ на основі Н-функції дуг початкового графа $G(X, Z)$, складають алгебру Н-функцій. Разом з правилами перетворення Н-функцій розглядаються правила для ймовірностей, математичних очікувань витрат ресурсів і їх щільності розподілів. Алгебра Н-функцій утворюється з трьох основних правил еквівалентних заміन в імовірнісному графі [12,19]: правило об'єднання послідовних дуг; правило видалення паралельних дуг; правило видалення кінцевої дуги-петлі.

Для імовірнісного графа ТФС "робоча - контроль функціонування" без обмеження на допустиму кількість циклів контролю, зображеного на рис. 1.1,б, матриця Н-функцій має вигляд:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{34} & H_{35} \\ H_{41} & 0 & H_{43} & 0 & 0 \\ 0 & H_{52} & H_{53} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Вирази для Н-функцій отримані відповідно до формули (1):

$$\begin{aligned} H_{34} &= L[B^1 F_P(t)] & H_{35} &= L[B^0 F_P(t)] \\ H_{43} &= [K^{10} F_K(t)] & H_{41} &= L[K^{11} F_K(t)] \\ H_{53} &= L[K^{00} F_K(t)] & H_{52} &= L[K^{01} F_K(t)] \end{aligned}$$

Тут $B^1(B^0)$ - ймовірність безпомилкового (помилкового) виконання робочої операції; K^{ij} - ймовірності ідентифікації контролем результату роботи як j за умови, що фактичний результат i ; $F_P(t)$, $F_K(t)$, - закони розподілу часу на виконання робочої операції і контроль функціонування відповідно.

При видаленні вершини 5 і створенні обмеженої однорідної петлі при вершині 3 (рис. 1.2, а), матриця набуває вигляду:

$$H^{-5} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & H_{32} & H'_{33}(m) & H_{34} \\ H_{41} & 0 & H_{43} & 0 \end{bmatrix}$$

Видалення вершини 4 (рис. 1.2,б) перетворює матрицю Н-функцій до виду:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ H_{31} & H_{32} & H'_{33}(m) + H''_{33}(m) \end{bmatrix}$$

Н-функції графа, зображеного на рис. 1.2,в, відповідно до правила 8, визначаються за формулами:

$$H_{31}^* = H_{31} \frac{1}{1 - H_{33}} = H_{34} H_{41} \frac{1}{1 - (H_{34} H_{43} + H_{35} H_{53})}$$

$$H_{32}^* = H_{32} \frac{1}{1 - H_{33}} = H_{35} H_{52} \frac{1}{1 - (H_{34} H_{43} + H_{35} H_{53})}$$

На основі отриманих підсумкових Н-функцій і формул (2), (3), (4) визначаються ймовірні характеристики структури шляхом підстановки параметра Н-функції $s = 0$.

1.3 Висновки з розділу 1

Моделюванню процесів людино-машинної взаємодії присвячені дослідження багатьох вчених широкого спектру наук, таких як: ергономіка, кібернетика, наукова організація праці, інженерна психологія.

Найбільш вдалим методом опису і оцінки діяльності операторів є узагальнений структурний метод функціональної структурної теорії ерготехнічних систем. Для використання узагальненого структурного методу розроблені математичні моделі типових функціональних структур діяльності. На жаль, математичні моделі орієнтовані на врахування лише одного типу помилки.

У зв'язку з можливістю наявності помилок різних типів вважаємо за доцільне використати існуючу методологію виводу розрахункових залежностей для випадку декількох помилок.

2 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ І ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ОПЕРАТОРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ З УРАХУВАННЯМ ПОМИЛОК РІЗНИХ ТИПІВ

2.1 Розробка принципів моделювання

Враховуючи досвід застосування функціонально-структурної теорії (ФСТ), сформулюємо ряд методологічних принципів, на яких базується методика застосування N-функцій для збільшення ймовірнісних графів ТФС, які враховують помилки різних типів.

Принцип багатовимірності функціональної мережі. При виконанні АФ можуть вноситися, виявлятися і усуватися помилки різних типів.

Принцип множинності результатів реалізації функції ФСТ. Результат виконання функції може мати N-арні наслідки ($N \geq 2$), N – визначається кінцевим числом помітних станів наслідків виконання функції, необхідних для вирішення моделюемого завдання.

Принцип збільшення кількості поглинаючих вершин. Кількість поглинаючих вершин імовірнісного графа, який відповідає ТФС, залежить від кількості різних типів помилок, які вносяться, виявляються і усуваються. На відміну від функціональних мереж, в яких оцінка якості ведеться за бінарним принципом: "немає помилок - є помилки" і, відповідно, імовірнісний граф має дві поглинаючі вершини, для багатовимірних функціональних мереж імовірнісні графи типових функціональних структур мають $N = 2^n$ поглинаючих вершин. Тут n- кількість різних типів помилок.

Після побудови імовірнісного графа, відповідного ТФС, алгоритм збільшення цього графа з використанням правил збільшення моделей [12] буде складатися з таких кроків:

1. Початок.

2. Перевірити умову "Початкових вершин більше однієї? ". Якщо "Так", то перейти на крок 3, інакше перейти на крок 6.
3. Перевірити умову "Чи припустимо об'єднання початкових вершин? ". Якщо "Так", то перейти на крок 4, інакше перейти на крок 6.
4. Об'єднати вершини за правилом 1.
5. Перейти на крок 2.
6. Перевірити умову "Чи є поглинаючі вершини, що допускають об'єднання?". Якщо так, то перейти на крок 7, інакше перейти на крок 9.
7. Об'єднати поглинаючі вершини за правилом 3.
8. Перейти на крок 6.
9. Перевірити умову "Чи є паралельні дуги?". Якщо "Так", то перейти на крок 10, інакше перейти на крок 12
10. Об'єднати паралельні дуги за правилом 2.
11. Перейти на крок 9.
12. Перевірити умову "Чи є транзитивні вершини?". Якщо "Так", то перейти на крок 13, інакше перейти на крок 15.
13. Видалити транзитивні вершини за правилом 4 і 5.
14. Перейти на крок 12.
15. Перевірити умову "Чи є рекурентні вершини?". Якщо "Так", то перейти на крок 16, інакше перейти на крок 21.
16. Перевірити умову "Чи є обмеження на число циклів? ". Якщо "Так", то перейти на крок 17, інакше перейти на крок 19.
17. Видалити рекурентні вершини за правилами 6 і 7.
18. Перейти на крок 6.
19. Видалити рекурентні вершини за правилом 8.
20. Перейти на крок 15.
21. Кінець.

2.2 Приклад розробки моделей для типових функціональних структур

2.2.1 Модель оцінки надійності діяльності оператора для типової функціональної структури «Робоча операція з контролем функціонування»

Покажемо застосування методики на прикладі алгоритму функціонування, в якому вносяться, виявляються і усуваються помилки двох типів. Для прикладу візьмемо ТФС "робоча - контроль функціонування" без обмеження на допустиму кількість m циклів контролю (тобто $m = \infty$), схема зменшення розмірності графа і зміни матриць Н-функцій, для якої бінарні результати операцій розглянуті в п.1.2. Граф-схема зазначеної ТФС зображена на рис. 1.1,а. Для побудови математичної моделі позначимо події, пов'язані з виконанням операцій, що входять в ТФС:

- 1) закінчення виконання структури з безпомилковим результатом по першій і другій помилці;
- 2) закінчення виконання структури з безпомилковим результатом по першій і помилковим результатом по другій помилці;
- 3) закінчення виконання структури з помилковим результатом по першій і безпомилковим результатом по другій помилці;
- 4) закінчення виконання структури з помилковим результатом по першій і помилковим результатом по другій помилці;
- 5) початок виконання структури;
- 6) закінчення виконання робочої операції з безпомилковим результатом по першій і другій помилці і перехід до операції контролю;
- 7) закінчення виконання робочої операції з безпомилковим результатом по першій і помилковим результатом по другій помилці і перехід до операції контролю;
- 8) закінчення виконання робочої операції з помилковим результатом по

першій і безпомилковим результатом по другій помилці і перехід до операції контролю;

9) закінчення виконання робочої операції з помилковим результатом по першій і другій помилці і перехід до операції контролю.

Імовірнісний граф даної структури показаний на рис. 2.1. Вершини графа відповідають зазначеним вище подіям. На рис. 2.2,а,б зображені фрагменти вихідного імовірнісного графа, що відображають результати операції контролю (повернення на робочу операцію). Замінімо ці фрагменти графа на рис. 2.1 на еквівалентні дуги з Н-функціями H_{65} , H_{75} , H_{85} і H_{95} , відповідно. Н-функції дуг графа, відповідно до формули (1), мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 H_{56} &= B^1_1 L[F_p(t)] * B^1_2 L[F_p(t)], & H_{57} &= B^1_1 L[F_p(t)] * B^0_2 L[F_p(t)], \\
 H_{58} &= B^0_1 L[F_p(t)] * B^1_2 L[F_p(t)], & H_{59} &= B^0_1 L[F_p(t)] * B^0_2 L[F_p(t)], \\
 H_{61} &= K^{11}_1 L[F_k(t)] * K^{11}_2 L[F_k(t)], & H_{72} &= K^{11}_1 L[F_k(t)] * K^{01}_2 L[F_k(t)], \\
 H_{83} &= K^{01}_1 L[F_k(t)] * K^{11}_2 L[F_k(t)], & H_{94} &= K^{01}_1 L[F_k(t)] * K^{01}_2 L[F_k(t)], \\
 H^1_{65} &= K^{10}_1 L[F_k(t)] * K^{10}_2 L[F_k(t)], & H^2_{65} &= K^{11}_1 L[F_k(t)] * K^{10}_2 L[F_k(t)], \\
 H^3_{65} &= K^{10}_1 L[F_k(t)] * K^{11}_2 L[F_k(t)], & H_{65} &= H^1_{65} + H^2_{65} + H^3_{65}, \\
 H^1_{75} &= K^{10}_1 L[F_k(t)] * K^{00}_2 L[F_k(t)], & H^2_{75} &= K^{11}_1 L[F_k(t)] * K^{00}_2 L[F_k(t)], \\
 H^3_{75} &= K^{10}_1 L[F_k(t)] * K^{01}_2 L[F_k(t)], & H_{75} &= H^1_{75} + H^2_{75} + H^3_{75},
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

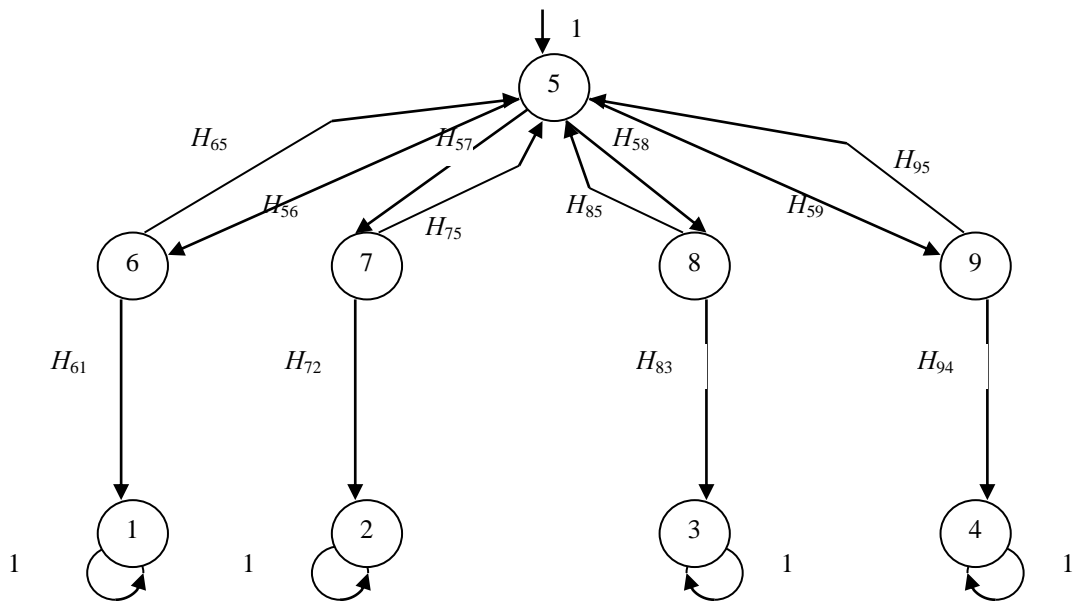


Рисунок 2.1 - Імовірнісний граф ТФС "робоча - контроль функціонування"

без обмеження на допустиму кількість m циклів контролю

$$\begin{aligned}
 H^1_{85} &= K^{00}_{1}L[F_k(t)] * K^{11}_{2}L[F_k(t)], & H^2_{85} &= K^{00}_{1}L[F_k(t)] * K^{10}_{2}L[F_k(t)], \\
 H^3_{85} &= K^{01}_{1}L[F_k(t)] * K^{10}_{2}L[F_k(t)], \\
 H_{85} &= H^1_{85} + H^2_{85} + H^3_{85}, \\
 H^1_{95} &= K^{00}_{1}L[F_k(t)] * K^{00}_{2}L[F_k(t)], & H^2_{95} &= K^{00}_{1}L[F_k(t)] * K^{01}_{2}L[F_k(t)], \\
 H^3_{95} &= K^{01}_{1}L[F_k(t)] * K^{01}_{2}L[F_k(t)], \\
 H_{95} &= H^1_{95} + H^2_{95} + H^3_{95};
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$B^1_{1(2)}$ ($B^0_{1(2)}$) - ймовірність виконання робочої операції без помилки (з помилкою) першого типу;

$B^1_{2(2)}$ ($B^0_{2(2)}$) - ймовірність виконання робочої операції без помилки (з помилкою) другого типу;

$$B^1_{1(2)} + B^0_{1(2)} = 1;$$

$K^{11}_{1(2)}$ - ймовірність ідентифікації контролем результату роботи робочої операції без першої (другої) помилки за умови, що фактично вона виконана без першої (другої) помилки;

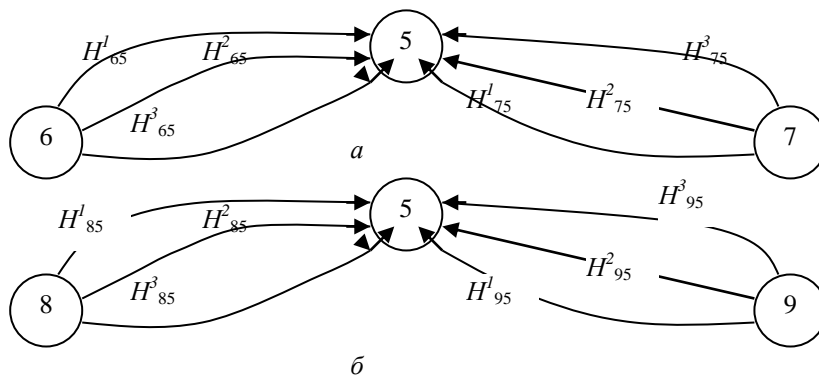


Рисунок 2.2 - Фрагменти імовірнісного графа, що відображають результати операції контролю

$K^{10}_{1(2)}$ - ймовірність ідентифікації контролем результату роботи робочої операції з першою (другою) помилкою за умови, що фактично вона виконана без першої (другої) помилки;

$K^{00}_{1(2)}$ - ймовірність ідентифікації контролем результату роботи робочої операції з першою (другою) помилкою за умови, що фактично вона виконана з першою (другою) помилкою;

$K^{01}_{1(2)}$ - ймовірність ідентифікації контролем результату роботи робочої

операції без першої (другої) помилки за умови, що фактично вона виконана з першою (другою) помилкою;

$$K_{1(2)}^{11} + K_{1(2)}^{10} = 1; K_{1(2)}^{00} + K_{1(2)}^{01} = 1;$$

$F_p(t)$, $F_k(t)$ - закони розподілу часу на виконання робочої операції і контроль функціонування, відповідно.

Матриця Н-функцій графа, зображеного на рис.2.2, має вигляд:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{56} & H_{57} & H_{58} & H_{59} \\ H_{61} & 0 & 0 & 0 & H_{65} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{72} & 0 & 0 & H_{75} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{83} & 0 & H_{85} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{94} & H_{95} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Розмірність матриці і графа може бути скорочена за рахунок транзитивних вершин 6, 7, 8 і 9. При видаленні вершини 9 в графі утворюється необмежена ($m = \infty$) петля (рис.2.3), а матриця набуває вигляду:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{54} & H'_{55} & H_{56} & H_{57} & H_{58} \\ H_{61} & 0 & 0 & 0 & H_{65} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{72} & 0 & 0 & H_{75} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{83} & 0 & H_{85} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

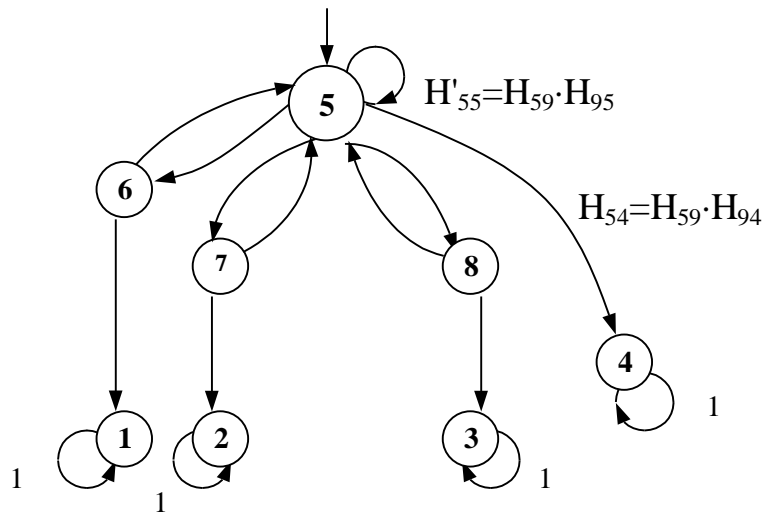


Рисунок 2.3 - Імовірнісний граф після видалення вершини 9

Після видалення вершини 8, в графі, зображеному на рис.2.3, утворюється друга необмежена ($m = \infty$) петля (рис. 2.4), а розмірність матриці знижується і вона набуває вигляду:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{53} & H_{54} & H'_{55} + H''_{55} & H_{56} & H_{57} \\ H_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{72} & 0 & 0 & H_{75} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

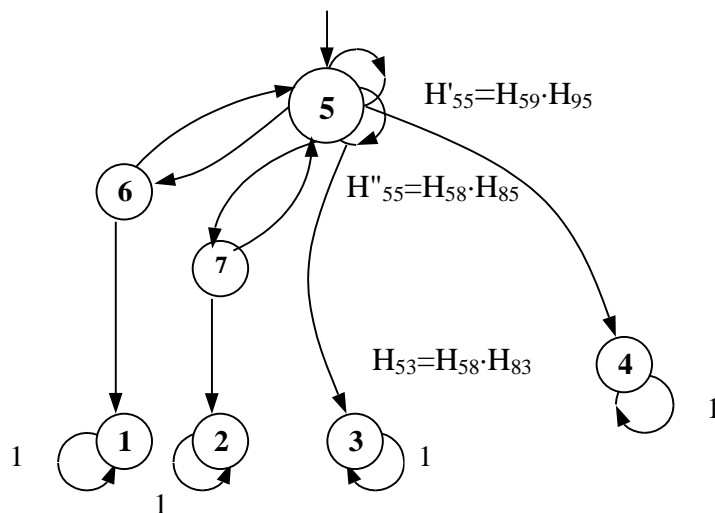
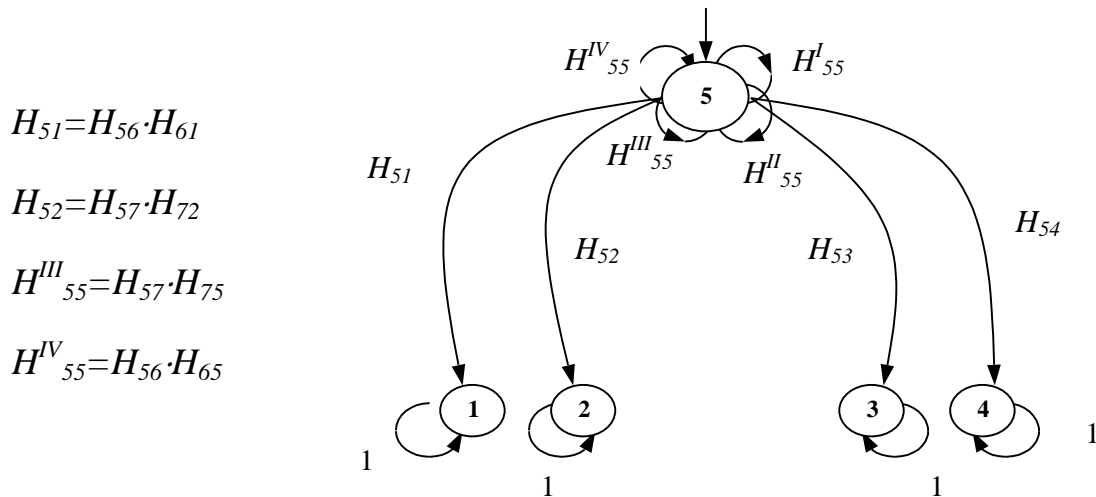


Рисунок 2.4 - Імовірнісний граф після видалення вершини 8

Аналогічним чином видаляються вершини графа 7 і 6, утворюючи при цьому нові дві необмежені петлі з Н-функціями $H'''_{55} = H_{57} \cdot H_{75}$ і $H^{IV}_{55} = H_{56} \cdot H_{65}$,

відповідно. В результаті отримаємо граф, що має в вершині чотири необмежені петлі (рис. 2.5). Графу відповідає матриця:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ H_{51} & H_{52} & H_{53} & H_{54} & H'_{55} + H''_{55} + H'''_{55} + H^{IV}_{55} \end{bmatrix}$$



$$H_{51} = H_{56} \cdot H_{61}$$

$$H_{52} = H_{57} \cdot H_{72}$$

$$H'''_{55} = H_{57} \cdot H_{75}$$

$$H^{IV}_{55} = H_{56} \cdot H_{65}$$

Рисунок 2.5 - Імовірнісний граф після видалення транзитивних вершин

Враховуючи рівноцінність петель при вершині 5, можна замінити їх однією однорідної петлею

$$H_{55} = H^I_{55} + H^II_{55} + H^III_{55} + H^{IV}_{55}$$

$$H_{55} = H_{59} \cdot H_{95} + H_{58} \cdot H_{85} + H_{57} \cdot H_{75} + H_{56} \cdot H_{65} \quad (8)$$

Користуючись правилом видалення необмеженої однорідної петлі, отримаємо підсумковий граф (рис. 2.6), для якого Н-функції мають вигляд:

$$H^*_{51} = H_{51} \frac{1}{1 - H_{55}}, \quad H^*_{52} = H_{52} \frac{1}{1 - H_{55}},$$

$$H^*_{53} = H_{53} \frac{1}{1 - H_{55}}, \quad H^*_{54} = H_{54} \frac{1}{1 - H_{55}} \quad (9)$$

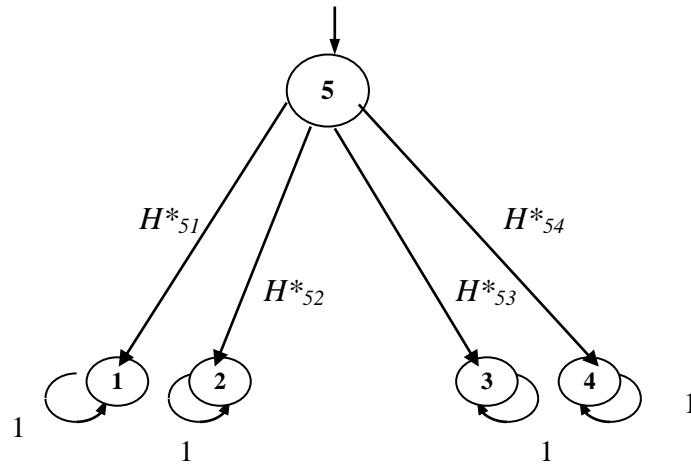


Рисунок 2.6 - Підсумковий імовірнісний граф

На основі отриманих підсумкових Н-функцій (формули 9), формул (1), (2) і виразів для Н-функцій вихідного імовірнісного графа (формули 6 і 7) отримаємо ймовірні характеристики шляхом підстановки параметра $s = 0$:

$V_{\{1,2\}} = H_{51}^*(0)$ - ймовірність виконання структури без першої і другої помилки;

$V_{\{1\}} = H_{52}^*(0)$ - ймовірність виконання структури з безпомилковим результатом по першій і помилковим результатом по другій помилці;

$V_{\{2\}} = H_{53}^*(0)$ - ймовірність виконання структури з помилковим результатом по першій і безпомилковим результатом по другій помилці;

$V_{\{0\}} = H_{54}^*(0)$ - закінчення виконання структури з помилковим результатом по першій і помилковим результатом по другій помилці.

$$H_{55}(0) = \sum_{\substack{l \in \{0,1\} \\ k \in \{0,1\}}} \left(B_1^l \cdot B_2^k \cdot \sum_{\substack{i \in \{0,1\} \\ j \in \{0,1\}}} K_1^{li} \cdot K_2^{kj} \right) \quad (10)$$

Тут: $(i=1) \cap (j=1) = \emptyset$

Для спрощення запису формул позначимо: $b = H_{55}(0)$. Тоді формули для визначення імовірнісних характеристик ТФС "робоча - контроль функціонування", в якій вносяться, виявляються і усуваються помилки двох типів, має вигляд:

$$\begin{aligned}
V_{\{1,2\}} &= \left(\prod_{m=1}^2 B_m^1 \cdot K_m^{11} \right) \cdot \frac{1}{1-b}; & V_{\{1\}} &= B_1^1 \cdot K_1^{11} \cdot B_2^0 \cdot K_2^{01} \frac{1}{1-b}; \\
V_{\{2\}} &= B_2^1 \cdot K_2^{11} \cdot B_1^0 \cdot K_1^{01} \frac{1}{1-b}; \\
V_{\{0\}} &= B_1^0 \cdot K_2^{01} \cdot B_2^0 \cdot K_2^{01} \frac{1}{1-b}.
\end{aligned} \tag{11}$$

Математичне очікування часу виконання структури визначається за формулою (3). В результаті отримуємо:

$$M = \frac{M(T_P) + M(T_K)}{1-b} \tag{12}$$

Аналогічним чином отримані формули, за якими визначаються ймовірні характеристики підсумкового графа, який відповідає ТФС "робоча - контроль функціонування" для 3-х, 4-х помилок. У разі n помилок результатний збільшений граф має 2^n поглинаючих вершин, що відповідають результатам виконання структури. Введемо модель робочої і контрольної операцій, в яких вносяться, виявляються і усуваються помилки різних n типів. Позначимо:

B_m^1 - ймовірність виконання робочої операції без помилки типу m;

$$m = 1, 2, \dots, n;$$

B_m^0 - ймовірність виконання робочої операції з помилкою типу m;

$$m = 1, 2, \dots, n;$$

K_m^{11} - ймовірність ідентифікації контролем результату роботи робочої операції без m-ої помилки за умови, що фактично вона виконана без m-ої помилки;

K_m^{10} - ймовірність ідентифікації контролем результату роботи робочої операції з m-ою помилкою за умови, що фактично вона виконана без m-ої помилки;

K_m^{01} - ймовірність ідентифікації контролем результату роботи робочої операції без m-ої помилки за умови, що фактично вона виконана з m-ою помилкою;

K_m^{00} - ймовірність ідентифікації контролем результату роботи робочої операції з m-ою помилкою за умови, що фактично вона виконана з m-ою

помилкою.

Введемо позначення двухальтернативного стану наявності помилки при виконанні робочої операції і двухальтернативного стану ідентифікації контролем результату роботи робочої операції:

$x = (0,1) - 0(1) - \epsilon$ (немає) помилки при виконанні робочої операції;

$y = (0,1) - 0(1)$ - контролем робоча операція визнана виконаною з помилкою (без помилки).

У разі n різних помилок в результаті виконання робочої операції може бути 2^n результатів. Стан наявності помилок може бути представлено матрицею X розмірності $2^n \times n$. Кожен рядок матриці характеризує стан наявності помилок одного результату. Перший рядок містить тільки нульові елементи і означає виконання робочої операції з усіма n помилками. Другий рядок містить нульові елементи в $n-1$ колонках і значення 1 в колонці з номером n . Тобто, заповнення матриці X елементами виконується за таким правилом:

Номер рядка матриці - $l = 1, 2, \dots, 2^n$. Значення елементів рядка з номером l - це цифри (рахуючи зліва - направо), що представляють число $l-1$ в двійковій системі числення. Кількість розрядів зазначеного числа відповідає кількості внесених помилок - n .

Слідуючи цьому правилу, наприклад, для кількості помилок $n = 2$ отримаємо матрицю X , яка характеризує стан наявності першої і другої помилки результатів виконання робочої операції:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

У загальному вигляді елемент матриці x_{lm} - це стан наявності помилки з номером m при результаті l виконання робочої операції. Тут: $l = 1, 2, \dots, 2^n$; $m = 1, 2, \dots, n$.

Аналогічно, стан ідентифікації контролем результату роботи робочої операції одного результату може бути представлено матрицею Y розмірності

$2^n \times n$. Тут n - кількість контрольованих помилок, 2^n - кількість випадків виконання контролю результатів роботи робочої операції одного результату. Заповнення елементами матриці Y виконується з вищевикладеним правилом. У загальному вигляді елемент матриці y_{km} - це стан ідентифікації контролем помилки з номером m при результаті k виконання контролю. Тут: $k = 1, 2, \dots, 2^n$; $m = 1, 2, \dots, n$.

Тоді результат виконання робочої операції і операції контролю в загальному вигляді можна визначити таким чином:

$B_m^{x_{lm}}$ - ймовірність виконання робочої операції для l -го результату за помилкою типу m ;

$B_m^{x_{lm}y_{km}}$ - ймовірність ідентифікації контролем результату роботи робочої операції для l -го результату за помилкою типу m ; результат контролю - k .

Для запису формул розрахунку імовірнісних характеристик підсумкового графа, який відповідає ТФС "робоча - контроль функціонування" для n помилок в загальному вигляді введемо позначення множин номерів типів помилок:

$Q^1 = \{q^1_1, q^1_2, \dots, q^1_{n1}\}$ - номери типів помилок, за якими ТФС виконана безпомилково;

$Q^0 = \{q^0_1, q^0_2, \dots, q^0_{n0}\}$ - номери типів помилок, за якими ТФС виконана з помилкою;

$n1 + n0 = n$ - кількість типів помилок.

Тоді формула визначення ймовірності безпомилкового виконання ТФС за $q^1_1, q^1_2, \dots, q^1_{n1}$ типами помилок, отримана із застосуванням методу Н-функцій, має вигляд:

$$V_{\{q^1_1, q^1_2, \dots, q^1_{n1}\}} = \left(\prod_{m1 \in Q^1} B_{m1}^1 K_{m1}^{11} \right) \left(\prod_{m0 \in Q^0} B_{m0}^0 K_{m0}^{01} \right) \frac{1}{1-b}, \quad (13)$$

де: b визначається за формулою:

$$b = \sum_{l=1}^{2^n} \left(\prod_{m=1}^n B_m^{x_{lm}} \times \left(\sum_{k=1}^{2^n} \prod_{m=1}^n K_m^{x_{lm}y_{km}} \right) \right), \quad (14)$$

тут: $\bigcap_{m=1}^n (y_{km} = 1) = \emptyset$ для всіх значень k

Імовірність безпомилкового виконання ТФС визначається за формулою:

$$V = \left(\prod_{m=1}^n B_m^1 K_m^{11} \right) \frac{1}{1-b} \quad (15)$$

Математичне очікування часу виконання структури визначається за формулою (12). При цьому величина b визначається за формулою (14).

2.2.2 Модель оцінки надійності діяльності оператора для типової функціональної структури «Робоча операція з контролем функціонування, доопрацюванням і повторенням робочої операції»

Розроблена модель для ТФС «Циклова функціональна структура робоча з контролем функціонування, доопрацюванням і повторенням робочої операції» без обмеження на допустиму кількість m циклів контролю, два типи помилок приведена у Додатку Г.

2.3 Комп'ютерне моделювання процесів виникнення і усунення помилок людини-оператора

Розглянемо моделювання процесу обробки даних в системі роздрібною торгівлі [20]. Є два типи найбільш важливих помилок:

1. Рівень поля запису (наприклад, не вказано номер каси);
2. Рівень запису (наприклад, ціна продажу менша за ціну постачальника).

Структура алгоритму функціонування процесу обробки даних задається ТФС "робоча- контроль функціонування", граф робіт якій зображений на рис. 1.1,а, граф подій - на рис. 2.1. З використанням отриманих моделей (11) і (12) визначаємо показники якості:

- $V_{\{1,2\}}$ - ймовірність того, що ТФС виконана безпомилково;
- $V_{\{1\}}$ - ймовірність того, що за першою помилкою (рівень поля записи) ТФС виконана безпомилково;

- $V_{\{2\}}$ - ймовірність того, що за другою помилкою (рівень запису) ТФС виконана безпомилково;
- - $V_{\{0\}}$ - ймовірність того, що ТФС виконана з двома помилками;
- - M - математичне очікування часу ТФС.

Обчислення виконуємо в середовищі MS Excel. Проведемо дослідження безпомилковості для наступних значень характеристик операції контролю:

K_1^{11}	0,8056	0,8389	0,8656	0,8967	0,9178	0,9412	0,9734	0,9923
$M_k(t)$	2,90	3,20	3,40	3,65	3,80	4,00	4,25	4,40

Для візуалізації результатів використовуємо майстер діаграм. На рис. 3.1 і рис. 3.2 представлені варіанти розрахунків і графіки, що відображають залежність результатів виконання ТФС з різними помилками від якості контрольної операції.

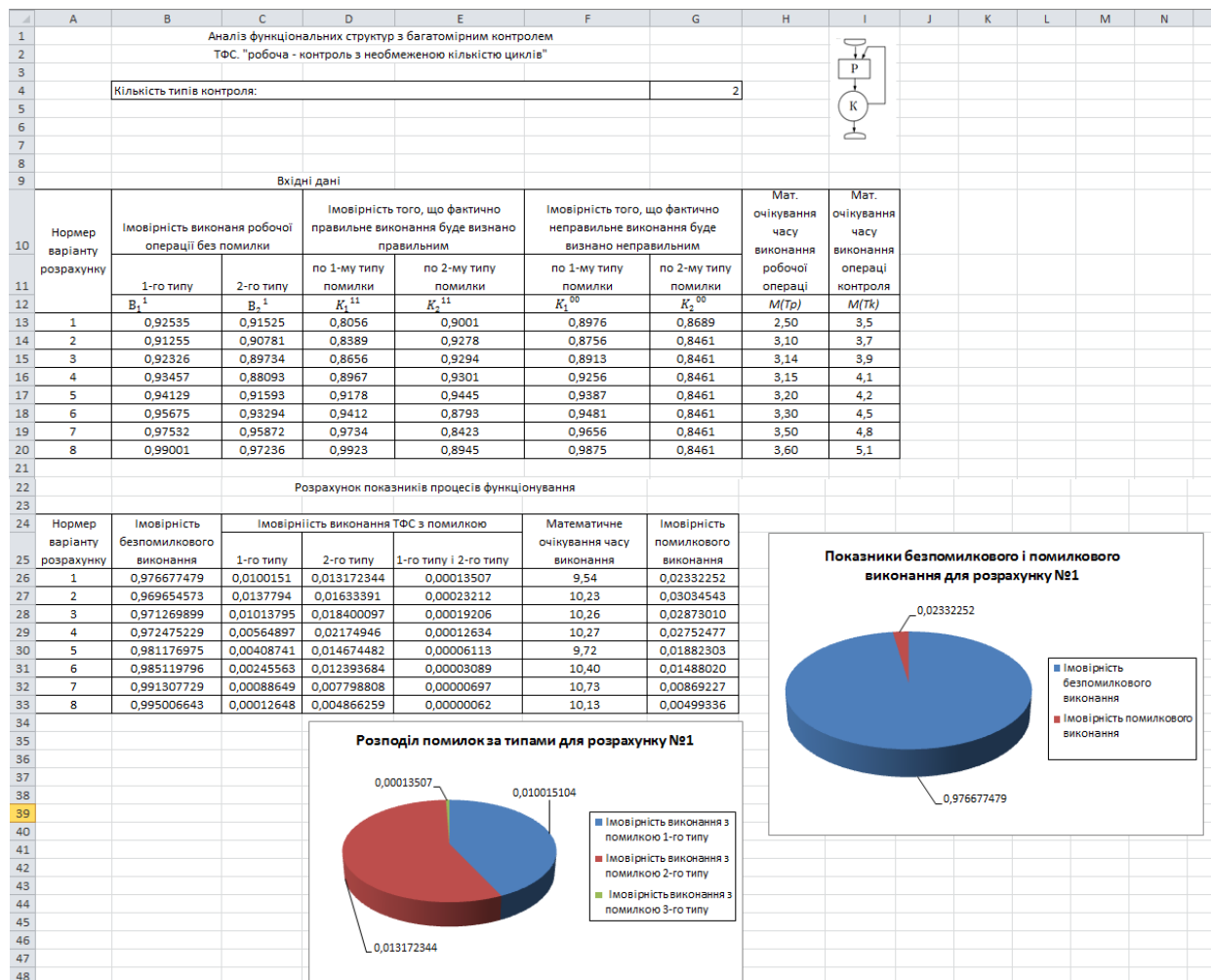
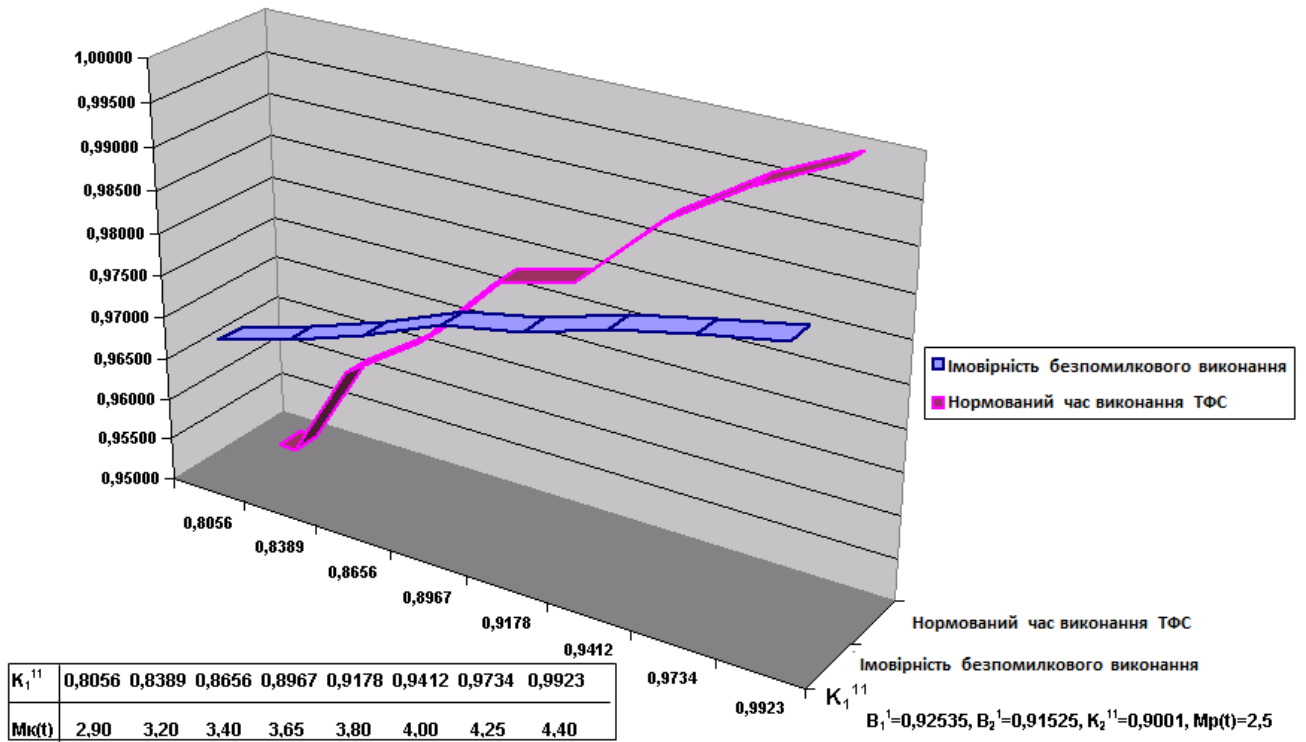


Рисунок 3.1 - Варіанти розрахунків якості виконання ТФС "робоча - контроль функціонування"

Вплив якості виконання контролю на безпомилковість виконання ТФС



Вплив якості виконання контролю на імовірність виконання ТФС з різними типами помилок

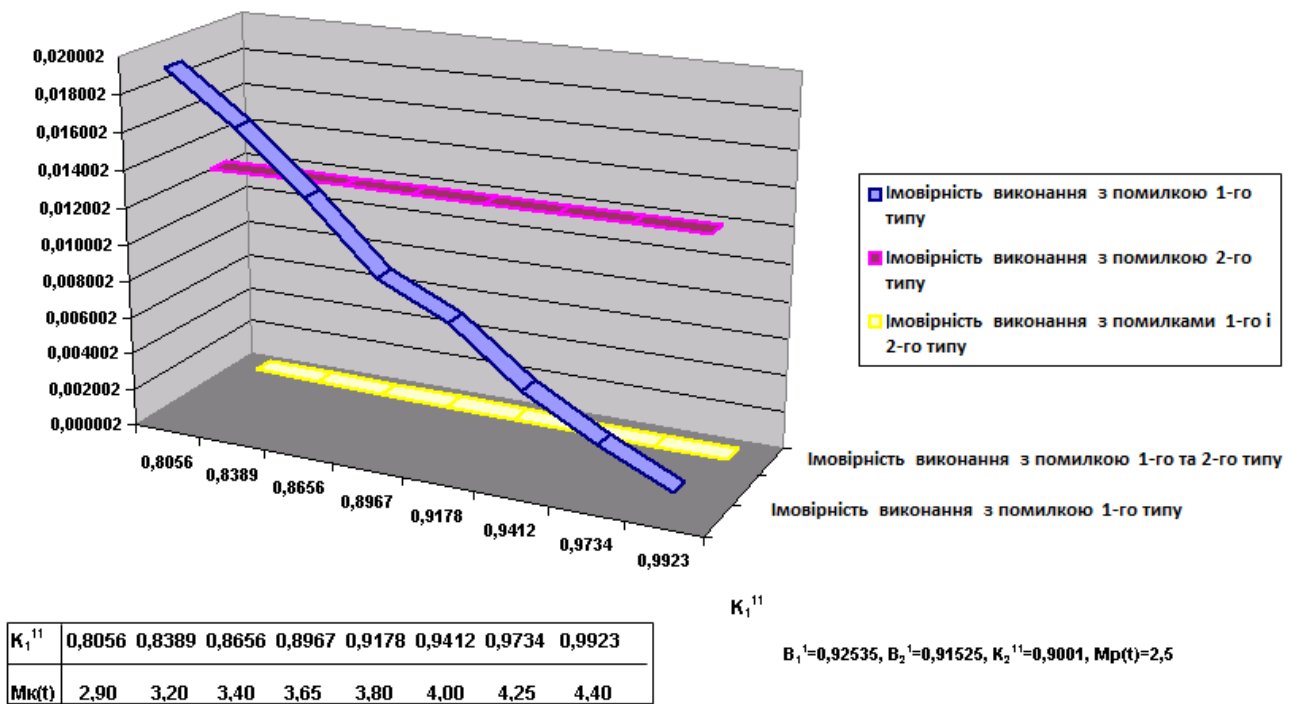


Рисунок 3.2 - Вплив якості виконання контролю на якість результатів виконання ТФС

2.4 Висновки з розділу 2

Використання методу базового графу та Н-функцій дозволяє отримувати математичні моделі для типових функціональних структур з врахуванням помилок різних типів. Використання запропонованого методу для двох типових функціональних структур продемонструвало роботоспроможність розробленої методики.

ВИСНОВКИ

Ефективне моделювання надійності ЛМС можливо тільки за умови врахування помилок різних типів. Це пов'язано з різними наслідками різних помилок. Для можливості автоматизації отримання оцінок безпомилковості необхідна бібліотека типових моделей. Вона може бути отримана на основі технології методу укрупнення імовірнісного графа проф. Губинського А.І.

Розроблено математичні моделі і інформаційну технологію для моделювання надійності людино-машинної взаємодії в АСУ з урахуванням можливості виникнення і усунення помилок різних типів.

Розробка дозволяє визначити:

- ймовірність безпомилкового виконання
- ймовірність виконання окремо з кожним типом помилки
- математичне очікування часу виконання

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1) Rothmorea, P. , Aylwardb, P., Karnona J. The implementation of ergonomics advice and the stage of change approach [Text]. / P. Rothmorea , P. Aylwardb, J. Karnona // Applied Ergonomics. – 2015. – № 51. – P. 370–376.
- 2) Bentley, T.A., Teo, S.T.T., McLeod, L., Tana, F., Bosua, R., Gloet, M. The role of organisational support in teleworker wellbeing: A socio-technical systems approach [Text] / T.A. Bentley, S.T.T. Teo, L. McLeod, F. Tana, R. Bosua, M. Gloet //Applied Ergonomics.– 2016.– № 52.– P. 207–215.
- 3) Wang, Y., Zheng, L., Hiu, T., Zheng, Q. Stress, burnout and job satisfaction: case of police force in China [Text] / Y. Wang, L. Zheng, T. Hiu //Public Pers. Manag. – 2014. – №43, – P. 325-339.
- 4) P. C. Cacciabue, “Human error risk management for engineering systems: a methodology for design, safety assessment, accident investigation and training,” Reliability Engineering & System Safety, vol. 83, Issue 2, pp. 229–269, 2014.
- 5) M. Havlikovaa, M. Jirglb, Z. Bradac, “Human reliability in man-machine systems,” Procedia Engineering, vol. 100, pp. 1207–1214, 2015.
- 6) N. A. Nazarenko, P. I. Paderno and I. G. Gorodetsky, "Training of ergonomists (preparation and retraining)," in Proceedings of the Third International Conference Ergo-2018: Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (Ergo-2018) , Saint Petersburg, Russia, 2018, pp. 77–81.
- 7) V. S. Martina and S. F. Sergeev, "Engineering and psychological problems of multidimensional interfaces," in Proceedings of the Third International Conference Ergo-2018: Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (Ergo-2018), Saint Petersburg, Russia, 2018, pp. 94–96.
- 8) A. V. Bogomolov, G. A. Sviridyuk, A. V. Keller, V. N. Zinkin and M. D. Alekhin, "Information-logical modeling of information collection and processing at the evaluation of the functional reliability of the aviation ergate control system operator," in Proceedings of the Third International Conference Ergo-2018: Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (Ergo-2018), Saint Petersburg, Russia, 2018, pp. 106–110.

- 9) M. G. Grif, E. V. Geniatulina, N. D. Ganelina, “Design and modelling in optimization of human-machine systems functioning,” in Proceedings of the International Siberian conference on control and communications (SIBCON-2015), Omsk, 21–23 May, 2015, Art. 87 (5 p.),.
- 10) M. G. Grif, S. A. Kocheto., N. D. Ganelina, “Functional-structural theory based techniques for human-machine systems optimal design,” in Proceedings of the 13 International Scientific. Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Russia, Novosibirsk, 3–6 October, 2016, vol. 1, part 2, pp. 494–497.
- 11) Ахьюджа Х. Сетевые методы управления в проектировании и производстве. Пер. с англ. /Под. ред. В. Н. Калашникова М.: Мир, 1979. – 638 с.
- 12) Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. Л.: Наука, 1982. - 270с.
- 13) Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. – М.: Энергоиздат, 1981. - 232 с.
- 14) Поспелов Д.А. Логические модели представления знаний. Вводные замечания // Представления знаний в человеко-машинных и робототехнических системах. – М.: ВИНТИ, 1984. -Т.А. - С.133-135.
- 15) Попович П.Р., Губинский А.И., Колесников Г.М. Эргономическое обеспечение деятельности космонавтов. – М.: Машиностроение, 1985. – 272с.
- 16) Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания: Справочник/Адаменко А.Н., Ашерев А.Т., и др. под общ. ред. Губинского А.И. и Евграфова Е.Г.- М., Машиностроение, 1993. – 528с.
- 17) Надежность и эффективность комплексных систем «человек—техника». Ч.3. Под ред. А. И. Губинского. Л., ЛДНТП, 1970. – 15с.
- 18) Губинский А.И., Гриф М.Г., Цой Е.Б. О некоторых алгоритмах оптимизации систем «человек-техника» // Применение ЭВМ в оптимальном планировании и проектировании. – Новосибирск: НГУ, 1981, - С. 148-154.
- 19) Ротштейн А.П., Кузнецов П.Д. Проектирование бездефектных человеко-машинных технологий. К.: Техника, 1992. - 180с.
- 20) <http://www.basegroup.ru/solutions/retailprofiler.htm>.

ДОДАТОК А

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПИСУ І ОЦІНКИ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛЮДИНО-МАШИНИХ СИСТЕМ

Таблиця А.1 - Порівняльний аналіз методів опису і оцінки людино-машинних систем

Метод Характеристика	Граф-схеми алгоритмів (ГСА)	Мережі PERT	Мережі GERT	Імітаційні моделі організаційно-технологічної надійності (ОТН)	Функціональні мережі	
					Граф-схеми	Функціональні мережі алгебраїзма
1. Загальні відомості						
1.1 Основний автор	Ляпунов А.А.	Ахьюджа Х.	Прицкер А.А	Гусаков А.А.	Губинський А.І. Ашерев Т.А.	Ротштейн А.П.
1.2 Рік розробки	1960	1979	1972	1972-1974	1969-1981 1977-1993	1990-1997
1.3 Основна спрямованість методу	Опис алгоритмів	Опис і оцінка комплексів робіт в промисловості і будівництві	Опис і оцінка довільних процесів	Опис і оцінка організаційно-технологічної надійності комплексів робіт в будівництві	Універсальна орієнтація на опис і оцінку будь-яких процесів функціонування. Опис і оцінка ефективності функціонування дискретних інформаційно виробничих ерготехнічних систем	Опис і оцінка бездефектного функціонування промислових ЛМС, в тому числі в нечітких умовах

Продовження таблиці А.1

Метод Характеристика	Граф-схеми алгоритмів (ГСА)	Мережі PERT	Мережі GERT	Імітаційні моделі організаційно-технологічної надійності (ОТН)	Функціональні мережі	
					Граф-схеми	Функціональні мережі алгебраїзма
1.4 Наявність засобів автоматизації моделювання	Ручні	На різних класах ЕОМ	На ЄС ЕОМ	На ЄС ЕОМ	На ЄС ЕОМ ПК	Персональні комп'ютери MS DOS
2.Опис можливостей методу						
2.1 Форма подання АФ ЕТС	Граф робіт (вершини - роботи, дуги - відношення слідування в часі)	Граф подій (вершини - події, дуги - роботи)	Граф подій (вершини - події, дуги - роботи)	Граф подій (вершини - події, дуги - роботи)	Граф "робіт-подій" (вершини двох типів: роботи і події, дуги - відношення слідування в часі з широкими логічними функціями)	Граф подій (вершини - події, дуги - роботи)
2.2 Склад символів алфавіту	Дві роботи (оператор і логічне умова)	Тільки роботи з одним результатом	Роботи з одним і двома результатами	Тільки роботи з одним результатом	П'ятнадцять функціонерів і чотирнадцять композиціонерів	Три оператора робіт і два оператора умов

Продовження таблиці А.1

Метод Характеристика	Граф-схеми алгоритмів (ГСА)	Мережі PERT	Мережі GERT	Імітаційні моделі організаційно-технологічної надійності (ОТН)	Функціональні мережі	
					Граф-схеми	Функціональні мережі алгебраїзма
2.3 Можливість представлення:						
а) послідовних робіт	Так	Так	Так	Так	Так	Так
б) паралельних робіт з ФАЛ на вході "І"	Ні	Так	Так	Так	Так	Так
в) паралельних робіт з ФАЛ на вході "АБО виключити" / "АБО включити"	Ні	Ні	Так	Ні	Так	Так
г) паралельних робіт з ФАЛ на виході "І"	Ні	Так	Так	Так	Так	Так

Продовження таблиці А.1

Метод Характеристика	Граф-схеми алгоритмів (ГСА)	Мережі PERT	Мережі GERT	Імітаційні моделі організаційно-технологічної надійності (ОТН)	Функціональні мережі	
					Граф-схеми	Функціональні мережі алгебраїзма
д) паралельних робіт з ФАЛ на виході "АБО виключити" / "АБО включити"	Так/Ні	Ні	Так	Ні	Так	Так
е) циклів (повернутий)	Так	Ні	Так	Ні	Так	Так
ж) циклів (доопрацьовань)	Ні	Ні	Так	Ні	Так	Так
3. Можливості обліку та подання переривань робіт через виявлені збої, помилки, відмови						
	Ні	Ні	Ні	Ні	Так	Так
4. Можливості обліку невиявлених збоїв, помилок, відмов						
	Ні	Ні	Ні	Ні	Так	Так
5. Основні недоліки методу						
	Слабкі логічні можливості	Неврахування переривань робіт через помилки, відмови	Неврахування переривань робіт через помилки, відмови	Неврахування переривань робіт через помилки, відмови	Висока складність методу	Висока складність методу

Продовження таблиці А.1

Метод Характеристика	Граф-схеми алгоритмів (ГСА)	Мережі PERT	Мережі GERT	Імітаційні моделі організаційно-технологічної надійності (ОТН)	Функціональні мережі	
					Граф-схеми	Функціональні мережі алгебраїзма
6. Загальна оцінка описових можливостей						
	Примітивна (історично перша спроба)	Слабка	Хороша	Слабка	Найбільш висока з усіх існуючих на сьогодні	Висока
7. Оцінка можливостей методу						
7.1 Облік стохастичності результатів (через помилки і відмови)	Ні	Ні	Так	Ні	Так	Так
7.2 Облік стохастичності часу виконання роботи	Ні	Так	Так	Ні	Так	Так

Продовження таблиці А.1

Метод Характеристика	Граф-схеми алгоритмів (ГСА)	Мережі PERT	Мережі GERT	Імітаційні моделі організаційно-технологічної надійності (ОТН)	Функціональні мережі	
					Граф-схеми	Функціональні мережі алгебраїзма
8. Характеристика часу виконання роботи						
8.1 Закон розподілу	Ні	Бета-розподіл	Нормальний або бета-розподіл	Нормальний або бета-розподіл	Гамма-розподіл (експоненціальний, нормальний, дискретний розподіл)	Різні функції розподілу
8.2 Показники	Ні	Параметри розподілу бети	Математичне сподівання і дисперсія	Математичне сподівання і дисперсія	Математичне сподівання і дисперсія	Математичне сподівання і дисперсія
9. Загальна характеристика оцінки можливостей методу						
9.1 Рівень	Нульовий	Тільки часові характеристики	Тільки часові характеристики (з урахуванням імовірнісних результатів)	Тільки часові характеристики (з урахуванням показника своєчасності)	Як вартові характеристики так і характеристики бездефектності (з урахуванням помилок, структурних відмов, оргвідмов)	Як вартові характеристики так і характеристики бездефектності (з урахуванням помилок, структурних відмов, оргвідмов)

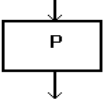
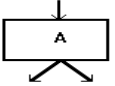
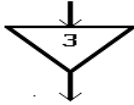
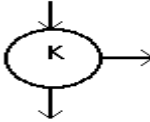
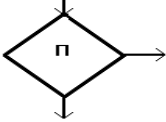
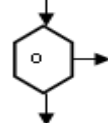
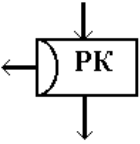
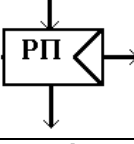
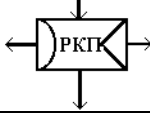
Продовження таблиці А.1

Метод Характеристика	Граф-схеми алгоритмів (ГСА)	Мережі PERT	Мережі GERT	Імітаційні моделі організаційно-технологічної надійності (ОТН)	Функціональні мережі	
					Граф-схеми	Функціональні мережі алгебраїзма
10. Загальна оцінка методу						
	Придатний тільки для опису структур алгоритмів і процесів	Придатний для оцінки часових характеристик процесів з обмеженою логікою	Придатний для оцінки часових характеристик процесів з ймовірними наслідками і розширеною логікою	Придатний для оцінки часових характеристик і своєчасності виконуваних процесів	Придатний для оцінки часових і надійносних характеристик будь-яких процесів функціонування ЕТС з урахуванням помилок, структурних відмов і оргвідмов	Придатний для оцінки часових і надійносних характеристик будь-яких процесів функціонування ЕТС з урахуванням помилок, структурних відмов і оргвідмов

ДОДАТОК Б

ТИПОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНІ ОДИНИЦІ

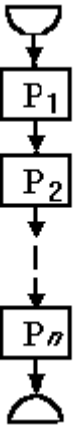
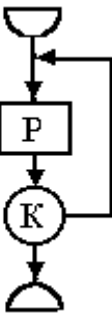
Таблиця Б.1 – Типові функціональні одиниці

Види функціонерів	Найменування	Умовне позначення
	Робочий	
Основні	Логічний (альтернативний)	
	Затримки	
	Функціональний контроль	
Допоміжні	Діагностичний контроль	
	Організаційний контроль	
	Робочий з одночасним контролем результатів функціонування	
	Робочий з одночасною діагностикою техніки	
	Робочий з одночасним контролем результатів функціонування і діагностикою техніки	

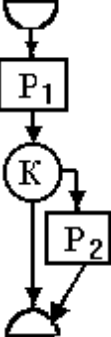
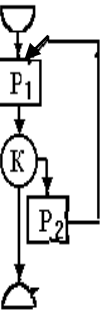
ДОДАТОК В

ТИПОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНІ СТРУКТУРИ ДЛЯ ОПИСУ ДІЯЛЬНОСТІ ОПЕРАТОРА

Таблиця В.1 – Типові функціональні структури

Зміст типової функціональної структури (ТФС)	Схема ТФС	Показник	Розрахункова формула
1. Послідовне виконання робочих операцій, <i>RR</i>		Вірогідність безпомилкового виконання операції	$B = \prod_{i=1}^n B_i$
		Математичне очікування часу виконання операції (трудомісткості, вартості)	$M(X) = \sum_{i=1}^n M(X_i)$ $X = \{T, W, C\}$
		Дисперсія часу виконання операції (трудомісткості, вартості)	$D(X) = \sum_{i=1}^n D(X_i)$ $X = \{T, W, C\}$
2. Циклова функціональна схема “Робоча операція з контролем функціонування без обмеження на кількість циклів”, <i>RK</i>		Вірогідність безпомилкового виконання операції	$B = B^1 * K^{11} * \frac{1}{1 - (B^1 * K^{10} + B^0 * K^{00})}$
Математичне очікування часу виконання операції (трудомісткості, вартості)	$M(X) = (M(X_p) + M(X_k)) * M(L)$ $M(L) = \frac{1}{1 - (B^1 * K^{10} + B^0 * K^{00})}$ $X = \{T, W, C\}$		

Продовження таблиці В.1

Зміст типової функціональної структури (ТФС)	Схема ТФС	Показник	Розрахункова формула
		Дисперсія часу виконання операції (трудомісткості, вартості)	$D(X) = D(L) * (M(X_p) + M(X_k))^2 + (D(X_p) + D(X_k)) * M(L)$ $D(L) = \frac{B^1 * K^{10} + B^0 * K^{00}}{(1 - (B^1 * K^{10} + B^0 * K^{00}))^2}$ $X = \{T, W, C\}$
Робоча операція з контролем функціонування і виправленням помилки без циклів, <i>RKR1</i>		Вірогідність безпомилкового виконання операції	$B = B_1^1 * K^{11} + (B_1^0 * K^{00} + B_1^1 * K^{10}) * B_2^1$
		Математичне очікування часу виконання операції (трудомісткості, вартості)	$M(X) = M(X_{p1}) + M(X_k) + (B_1^0 * K^{00} + B_1^1 * K^{10}) * M(X_{p2})$ $X = \{T, W, C\}$
		Дисперсія часу виконання операції (трудомісткості, вартості)	$D(X) = D(X_{p1}) + D(X_k) + (B_1^0 * K^{00} + B_1^1 * K^{10}) * D(X_{p2}) + (B_1^0 * K^{00} + B_1^1 * K^{10}) * (B_1^1 * K^{11} + B_1^0 * K^{01}) * M^2(X_{p2})$ $X = \{T, W, C\}$
Циклава ФС «Робоча операція з контролем функціонування, виправленням і повторенням робочої операції без обмеження на кількість циклів», <i>RK</i>		Вірогідність безпомилкового виконання операції	$B = \frac{B_1^1 * K^{11} (1 - K^{00} * B_2^0)}{K^{01} + B_1^1 * B_2^1 (K^{11} - K^{01})}$
Математичне очікування часу виконання операції (трудомісткості, вартості)	$M(X) = M(X_{p1}) + M(X_k) + [M(X_{p1}) + M(X_{p2}) + M(X_k)] * \frac{B_1^1 * K^{10} + B_1^0 * K^{00}}{1 - (B^1 * K^{10} + B^0 * K^{00})}$ <p>де</p> $B^1 = B_1^1 * B_2^1; \quad B^0 = 1 - B^1$		

Продовження таблиці В.1

Зміст типової функціональної структури (ТФС)	Схема ТФС	Показник	Розрахункова формула
		Дисперсія часу виконання операції (трудомісткості, вартості)	$D(T) = D(X_{p1}) + D(X_k) + [D(X_{p1}) + D(X_{p2}) + D(X_k)]^*$ $* \frac{B_1^1 * K^{10} + B_1^0 * K^{00}}{1 - (B^1 K^{10} + B^0 * K^{00})} +$ $+ \frac{B_1^1 * K^{10} + B_1^0 * K^{00}}{(1 - (B^1 K^{10} + B^0 * K^{00}))^2} *$ $* \frac{B_1^1 * K^{10} + B_1^0 * K^{00}}{1 - (B^1 K^{10} + B^0 * K^{00})} *$ $* \frac{B_1^1 * K^{11} + B_1^0 * K^{01}}{(1 - (B^1 K^{10} + B^0 * K^{00}))^2} *$ $* [M(X_{p1}) + M(X_{p2}) + M(X_k)]^2$ <p>де $X = \{T, W, C\}$</p>

ДОДАТОК Г

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ДЛЯ ТФС «РОБОЧА ОПЕРАЦІЯ З КОНТРОЛЕМ ФУНКЦІОНУВАННЯ, ДООПРАЦЮВАННЯМ І ПОВТОРЕННЯМ РОБОЧОЇ ОПЕРАЦІЇ»

Граф-схема зазначеної ТФС зображена на рис. Г.1.

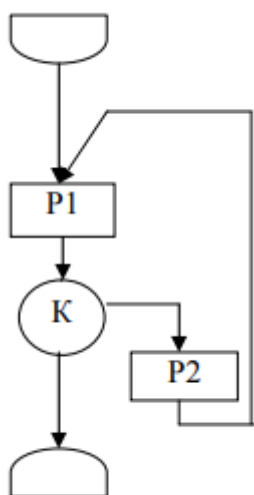


Рисунок Г1 - Граф робіт циклової ФС «Робоча операція з контролем функціонування, доопрацюванням і повторенням робочої операції».

Для побудови математичної моделі позначимо події, пов'язані з виконанням операцій, що входять в ТФС. Вершини імовірнісного графа (рис. Г.2) відповідають наступним подіям:

- 1) закінчення виконання структури з безпомилковим результатом по першій і другій помилці;
- 2) закінчення виконання структури з безпомилковим результатом по першій і помилковим результатом по другій помилці;
- 3) закінчення виконання структури з помилковим результатом по першій і безпомилковим результатом по другій помилці;

- 4) закінчення виконання структури з помилковим результатом по першій і помилковим результатом по другій помилці;
- 5) початок виконання структури;
- 6) закінчення виконання робочої операції з безпомилковим результатом по першій і другій помилці і перехід до операції контролю;
- 7) закінчення виконання робочої операції з безпомилковим результатом по першій і помилковим результатом по другій помилці і перехід до операції контролю;
- 8) закінчення виконання робочої операції з помилковим результатом по першій і безпомилковим результатом по другій помилці і перехід до операції контролю;
- 9) закінчення виконання робочої операції з помилковим результатом по першій і другій помилці і перехід до операції контролю.
- 10) закінчення виконання операції доопрацювання з безпомилковим результатом по першій і другій помилці і перехід до робочої операції;
- 11) закінчення виконання операції доопрацювання з безпомилковим результатом по першій і помилковим результатом по другій помилці і перехід до робочої операції;
- 12) закінчення виконання операції доопрацювання з помилковим результатом по першій і безпомилковим результатом по другій помилці і перехід до робочої операції;
- 13) закінчення виконання операції доопрацювання з помилковим результатом по першій і другій помилці і перехід до робочої операції.

Імовірнісний граф даної структури показаний на рис. Г.2. Вершини графа відповідають зазначеним вище подіям.

Н-функції дуг графа, показаного на рис. Г.2, мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 H_{56} &= B_{p1}^1 \cdot L[F_p(t)] \cdot B_{p2}^1 \cdot L[F_p(t)], & H_{57} &= B_{p1}^1 \cdot L[F_p(t)] \cdot B_{p2}^0 \cdot L[F_p(t)], \\
 H_{58} &= B_{p1}^0 \cdot L[F_p(t)] \cdot B_{p2}^1 \cdot L[F_p(t)], & H_{59} &= B_{p1}^0 \cdot L[F_p(t)] \cdot B_{p2}^0 \cdot L[F_p(t)], \\
 H_{61} &= K_{11}^1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{21}^1 \cdot L[F_k(t)], & H_{94} &= K_{11}^0 \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{21}^0 \cdot L[F_k(t)], \\
 H_{610} &= K_{11}^1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{21}^0 \cdot L[F_k(t)] + K_{11}^0 \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{21}^0 \cdot L[F_k(t)] + K_{11}^1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{21}^1 \cdot L[F_k(t)],
 \end{aligned}$$

$$H_{710} = K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{810} = K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{910} = K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)],$$

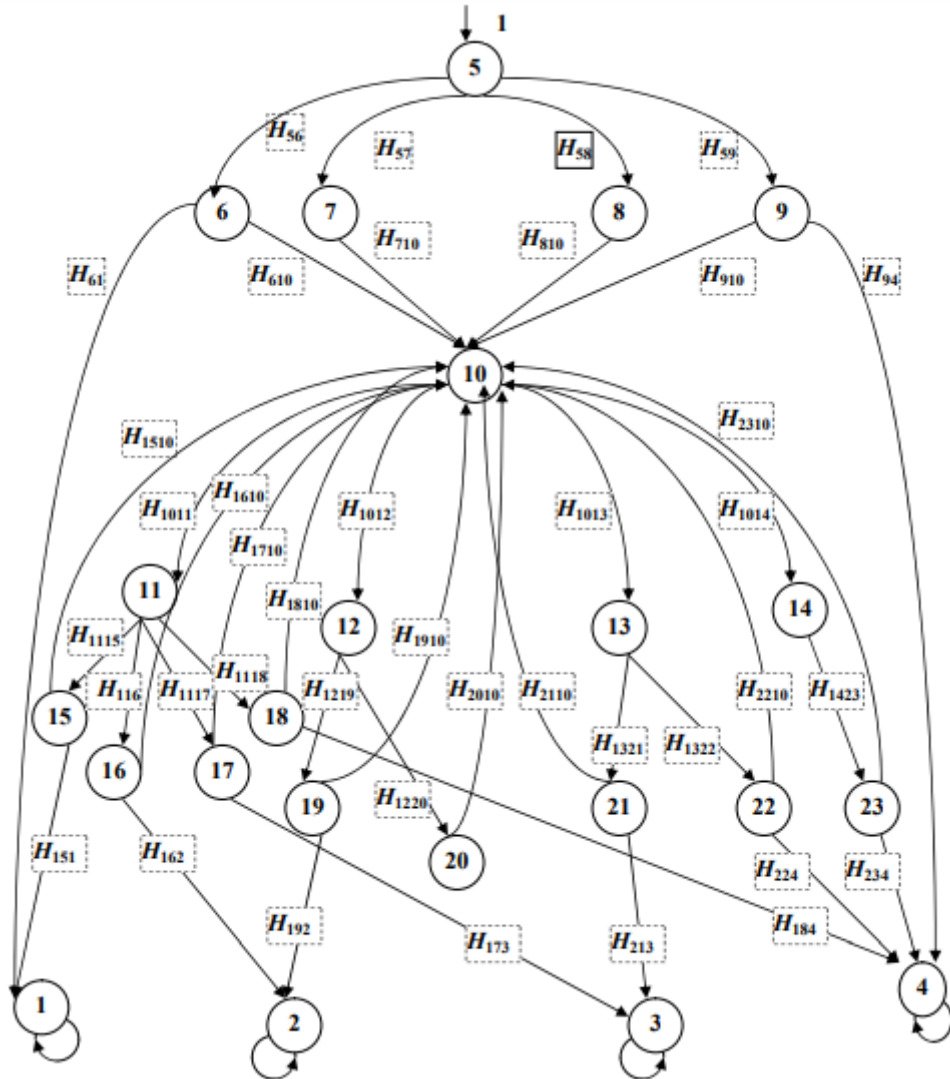


Рисунок Г.2 - Імовірнісний граф ТФС «Робоча операція з контролем функціонування, доопрацюванням і повторенням робочої операції»

$$H_{1510} = K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] + K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1610} = K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1710} = K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1810} = K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1910} = K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{2010} = K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{2110} = K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{2210}=K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{2310}=K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1011}=B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \quad H_{1012}=B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^0_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)],$$

$$H_{1013}=B^0_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \quad H_{1014}=B^0_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^0_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)],$$

$$H_{1115}=B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)], \quad H_{1116}=B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)],$$

$$H_{1117}=B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)], \quad H_{1118}=B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)],$$

$$H_{1219}=B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)], \quad H_{1220}=B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)],$$

$$H_{1321}=B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)], \quad H_{1322}=B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)],$$

$$H_{1423}=B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)], \quad H_{151}=K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{162}=K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], \quad H_{173}=K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{184}=K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], \quad H_{192}=K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{204}=K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], \quad H_{213}=K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{224}=K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], \quad H_{234}=K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)]. \quad (\Gamma 1)$$

Розмірність графа зменшуємо шляхом об'єднання послідовних дуг: (10,11) і (11,15); (10,11) і (11,16); (10,11) і (11,17); (10,11) і (11,18); (10,12) і (12,19); (10,12) і (12,20); (10,13) і (13,21); (10,13) і (13,22); (10,14) і (13,23). Отримаємо еквівалентний граф, зображений на рис. Г.3. Н-функції дуг графа мають вигляд:

$$H_{1110}=K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] + K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1210}=K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1310}=K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1410}=K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1510}=K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1610}=K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1710}=K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

$$H_{1810}=K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)],$$

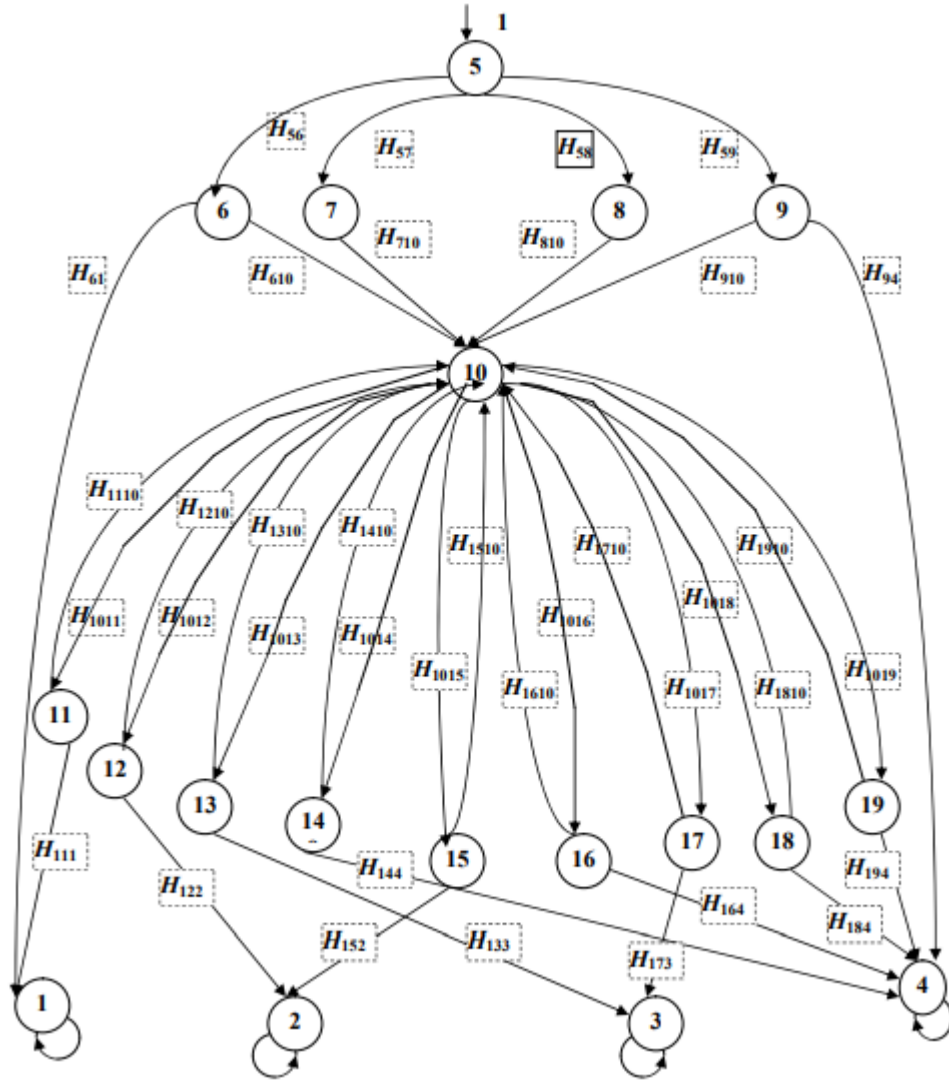


Рисунок Г.3 - Еквівалентний імовірнісний граф після видалення вершин 11, 12, 13 і 14 вихідного графа

$$\begin{aligned}
 H_{1910} &= K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
 H_{1011} &= B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \\
 H_{1012} &= B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \\
 H_{1013} &= B^0_{p1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \\
 H_{1014} &= B^0_{p1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \\
 H_{1015} &= B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^0_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \\
 H_{1016} &= B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^0_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \\
 H_{1017} &= B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \\
 H_{1018} &= B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \\
 H_{1019} &= B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^0_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)],
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_{111} &= K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{122} &= K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{133} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{144} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{152} &= K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{164} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{173} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{184} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{194} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)]. \tag{Г2}
\end{aligned}$$

Розмірність графа може бути скорочена за рахунок транзитивних вершин 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 і 19. При видаленні вершини 11 в графі утворюється необмежена ($m = \infty$) петля (рис. Г.4), Н-функція якої набуває вигляду:

$$\begin{aligned}
H^I_{1010} &= H_{1110} \cdot H_{1011} = \\
&= (K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] + K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)]) \cdot \\
&\quad \cdot B^I_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^I_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^I_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^I_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)]. \tag{Г3}
\end{aligned}$$

Спростимо формулу (Г.3) для визначення H^I_{1010} :

$$H^I_{1010} = (K^{11}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{11}_2 \cdot K^{10}_1 + K^{10}_2 \cdot K^{10}_1) \cdot B^I_{p1} \cdot B^I_{p2} \cdot B^I_{\delta 1} \cdot B^I_{\delta 2}.$$

Аналогічно утворюються необмежені петлі при видаленні вершин 12, 13, ..., 19 з Н-функціями відповідно:

$$H^{II}_{1010} = H_{1210} \cdot H_{1012} = (K^{10}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{11}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_2 \cdot K^{10}_1) \cdot B^I_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^I_{\delta 1} \cdot B^I_{\delta 2};$$

$$H^{III}_{1010} = H_{1310} \cdot H_{1013} = (K^{11}_2 \cdot K^{00}_1 + K^{01}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{10}_2) \cdot B^0_{p1} \cdot B^I_{p2} \cdot B^I_{\delta 1} \cdot B^I_{\delta 2};$$

$$H^{IV}_{1010} = H_{1410} \cdot H_{1014} = (K^{01}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2) \cdot B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^I_{\delta 1} \cdot B^I_{\delta 2}$$

$$H^V_{1010} = H_{1510} \cdot H_{1015} = (K^{11}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{10}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{10}_1 \cdot K^{00}_2) \cdot B^I_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^I_{\delta 1} \cdot B^0_{\delta 2},$$

де $B^0_{p2} = 1$;

$$H^{VI}_{1010} = H_{1610} \cdot H_{1016} = (K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{00}_2) \cdot B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^I_{\delta 1} \cdot B^0_{\delta 2},$$

де $B^0_{p2} = 1$;

$$H^{VII}_{1010} = H_{1710} \cdot H_{1017} = (K^{00}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{11}_2) \cdot B^0_{p1} \cdot B^I_{p2} \cdot B^0_{\delta 1} \cdot B^I_{\delta 2},$$

де $B^0_{p1} = 1$;

$$H^{VIII}_{1010} = H_{1810} \cdot H_{1018} = (K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2) \cdot B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^0_{\delta 1} \cdot B^I_{\delta 2},$$

де $B^0_{p1} = 1$;

$$H^{IX}_{1010} = H_{1910} \cdot H_{1019} = (K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2) \cdot B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^0_{\delta 1} \cdot B^I_{\delta 2}, \tag{Г4}$$

де $B^0_{p1} = 1$ і $B^0_{p2} = 1$.

Об'єднуємо послідовні дуги: (10,11) і (11,1); (10,12) і (12,2); (10,13) і (13,3); (10,14) і (14,4); (10,15) і (15,2); (10,16) і (16,4); (10,17) і (17,3); (10,18) і (18,4); (10,19) і (19,4). Отримаємо вираз для Н-функцій:

$$\begin{aligned}
 H_{101} &= H_{1011} \cdot H_{111} = B^1_{p1} \cdot B^1_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot K^{11}_1 \cdot K^{11}_2; \\
 H^1_{102} &= H_{1012} \cdot H_{122} = B^1_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot K^{11}_1 \cdot K^{01}_2; \\
 H^2_{102} &= H_{1015} \cdot H_{152} = B^1_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^0_{\partial 2} \cdot K^{11}_1 \cdot K^{01}_2 = B^1_{p1} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^0_{\partial 2} \cdot K^{11}_1 \cdot K^{01}_2; \\
 H^1_{103} &= H_{1013} \cdot H_{133} = B^0_{p1} \cdot B^1_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot K^{01}_1 \cdot K^{11}_2; \\
 H^2_{103} &= H_{1017} \cdot H_{173} = B^0_{p1} \cdot B^1_{p2} \cdot B^0_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot K^{01}_1 \cdot K^{11}_2 = B^1_{p2} \cdot B^0_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot K^{01}_1 \cdot K^{11}_2; \\
 H^1_{104} &= H_{1014} \cdot H_{144} = B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot K^{01}_1 \cdot K^{01}_2; \\
 H^2_{104} &= H_{1016} \cdot H_{164} = B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^0_{\partial 2} \cdot K^{01}_1 \cdot K^{01}_2 = B^0_{p1} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^0_{\partial 2} \cdot K^{01}_1 \cdot K^{01}_2; \\
 H^3_{104} &= H_{1018} \cdot H_{184} = B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^0_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot K^{01}_1 \cdot K^{01}_2 = B^0_{p2} \cdot B^0_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot K^{01}_1 \cdot K^{01}_2; \\
 H^4_{104} &= H_{1019} \cdot H_{194} = B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^0_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot K^{01}_1 \cdot K^{01}_2 = B^0_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot K^{01}_1 \cdot K^{01}_2. \quad (\Gamma 5)
 \end{aligned}$$

Вид імовірнісного графа після видалення транзитивних вершин показаний на рис. Г.4.

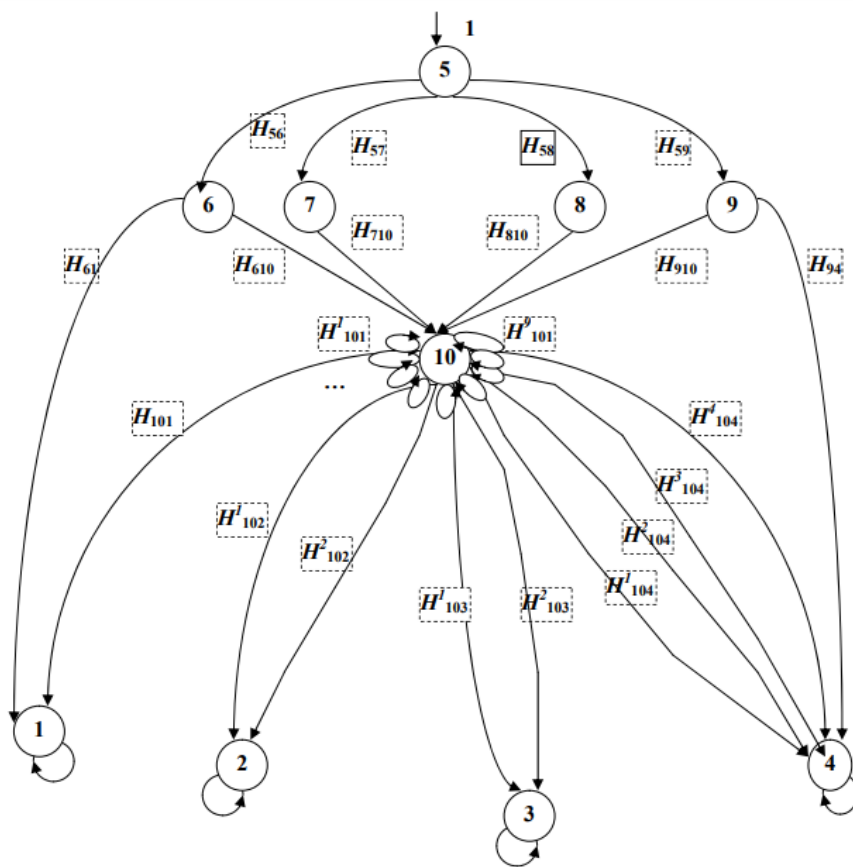


Рисунок Г.4 - Еквівалентний імовірнісний граф після видалення транзитивних вершин

Замінімо дев'ять петель на одну еквівалентну. Вираз Н-функції для еквівалентної петлі матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
 H_{1010} &= H^I_{1010} + H^{II}_{1010} + H^{III}_{1010} + H^{IV}_{1010} + H^V_{1010} + H^{VI}_{1010} + H^{VII}_{1010} + H^{VIII}_{1010} + H^X_{1010} = \\
 &= B^l_{p1} \cdot B^l_{p2} \cdot B^l_{\partial 1} \cdot B^l_{\partial 2} \cdot (K^{11}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{11}_2 \cdot K^{10}_1 + K^{10}_2 \cdot K^{10}_1) + \\
 &+ B^l_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^l_{\partial 1} \cdot B^l_{\partial 2} \cdot (K^{10}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{11}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_2 \cdot K^{10}_1) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^l_{p2} \cdot B^l_{\partial 1} \cdot B^l_{\partial 2} \cdot (K^{11}_2 \cdot K^{00}_1 + K^{01}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{10}_2) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^l_{\partial 1} \cdot B^l_{\partial 2} \cdot (K^{01}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2) + \\
 &+ B^l_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^l_{\partial 1} \cdot B^0_{\partial 2} \cdot (K^{11}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{10}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{10}_1 \cdot K^{00}_2) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^l_{\partial 1} \cdot B^0_{\partial 2} \cdot (K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{00}_2) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^l_{p2} \cdot B^0_{\partial 1} \cdot B^l_{\partial 2} \cdot (K^{00}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{11}_2) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^0_{\partial 1} \cdot B^l_{\partial 2} \cdot (K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^0_{\partial 1} \cdot B^l_{\partial 2} \cdot (K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2) = \\
 &= \sum_{\substack{l=0,1 \\ k=0,1 \\ m_1=0,1 \\ m_2=0,1}} (B^1_{p1} \cdot B^k_{p2} \cdot B^{m_1}_{D1} \cdot B^{m_2}_{D2} \cdot \sum_{\substack{i=0,1 \\ j=0,1}} K_1^{li} \cdot K_2^{kj}) \quad (Г6)
 \end{aligned}$$

де $(m_l=0) \cap (l=1) = \emptyset$; $(m_2=0) \cap (k=1) = \emptyset$; $(i=1) \cap (j=1) = \emptyset$;

якщо $m_l=0$, то $B^l_{p1}=1$; якщо $m_2=0$, то $B^l_{\partial 1}=1$.

Еквівалентний імовірнісний граф після заміни петель на одну приймає вигляд, показаний на рис. Г.5.

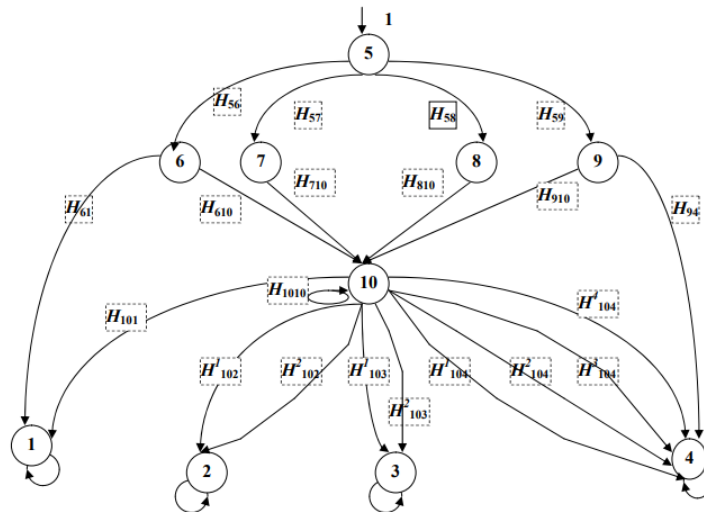


Рисунок Г.5 - Еквівалентний імовірнісний граф після видалення після заміни петель на одну петлю

Введемо позначення: $b = H_{1010}$. У разі обмеженою однорідної петлі (число повторень циклу - m), користуючись правилом видалення однорідної обмеженою петлі, отримаємо новий граф з додатковою поглинаючою вершиною, що відповідає за не закінчення процесу за m циклів ($m = 1, 2, \dots$), для якого Н-функція має вигляд:

$$H_{10r}^* = H_{10r} \cdot \frac{1 - (H_{1010})^m}{1 - H_{1010}}, \quad (\Gamma 7)$$

де $r = 1, 2, 3, 4$. Введемо позначення: $H_{1010}^* = (H_{1010})^m$. У разі ТФС «робоча - контроль функціонування - доробка з повторенням робочої» з необмеженим числом повторень, тобто $m = \infty$, $H_{1010}^* \rightarrow 0$, тоді:

$$H_{10r}^* = H_{10r} \cdot \frac{1}{1 - H_{1010}} \quad (\Gamma 8)$$

де $r = 1, 2, 3, 4$. Для додаткової поглинаючої вершини Н-функція буде дорівнює 0, тобто H_{1010}^* . Граф в цьому випадку має вигляд, показаний на рис. Г.6. Н-функції графа визначаються за формулою (Г.8):

$$H_{101}^* = H_{101} \cdot \frac{1}{1 - H_{1010}} = H_{101} \cdot \frac{1}{1 - b};$$

$$H_{102}^* = (H_{102}^1 + H_{102}^2) \cdot \frac{1}{1 - H_{1010}} = (H_{102}^1 + H_{102}^2) \cdot \frac{1}{1 - b};$$

$$H_{103}^* = (H_{103}^1 + H_{103}^2) \cdot \frac{1}{1 - H_{1010}} = (H_{103}^1 + H_{103}^2) \cdot \frac{1}{1 - b};$$

$$H_{104}^* = (H_{104}^1 + H_{104}^2 + H_{104}^3 + H_{104}^4) \cdot \frac{1}{1 - H_{1010}} = (H_{104}^1 + H_{104}^2 + H_{104}^3 + H_{104}^4) \cdot \frac{1}{1 - b}.$$

Приберемо проміжні вершини 6, 7, 8, 9 і 10. Граф набуде вигляду, показаний на рис. Г7.

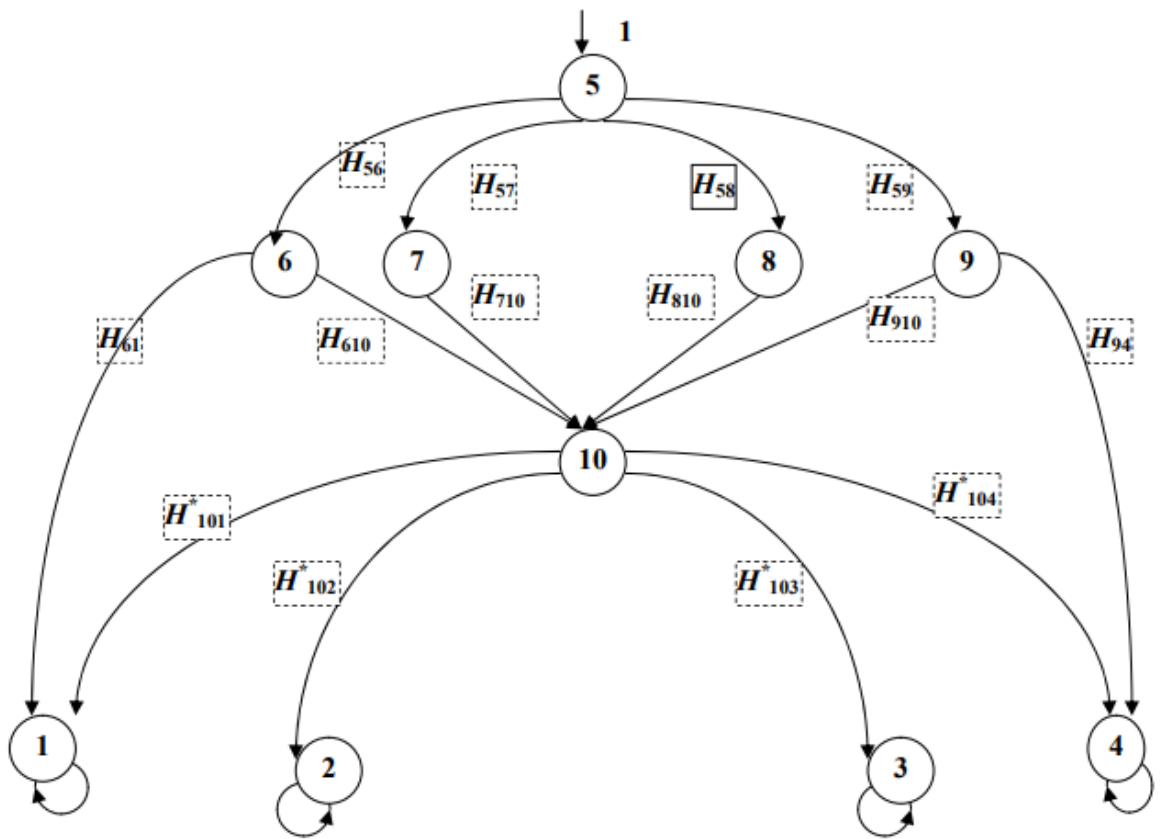


Рисунок Г.6 - Еквівалентний імовірнісний граф після видалення однорідної обмеженою петлі

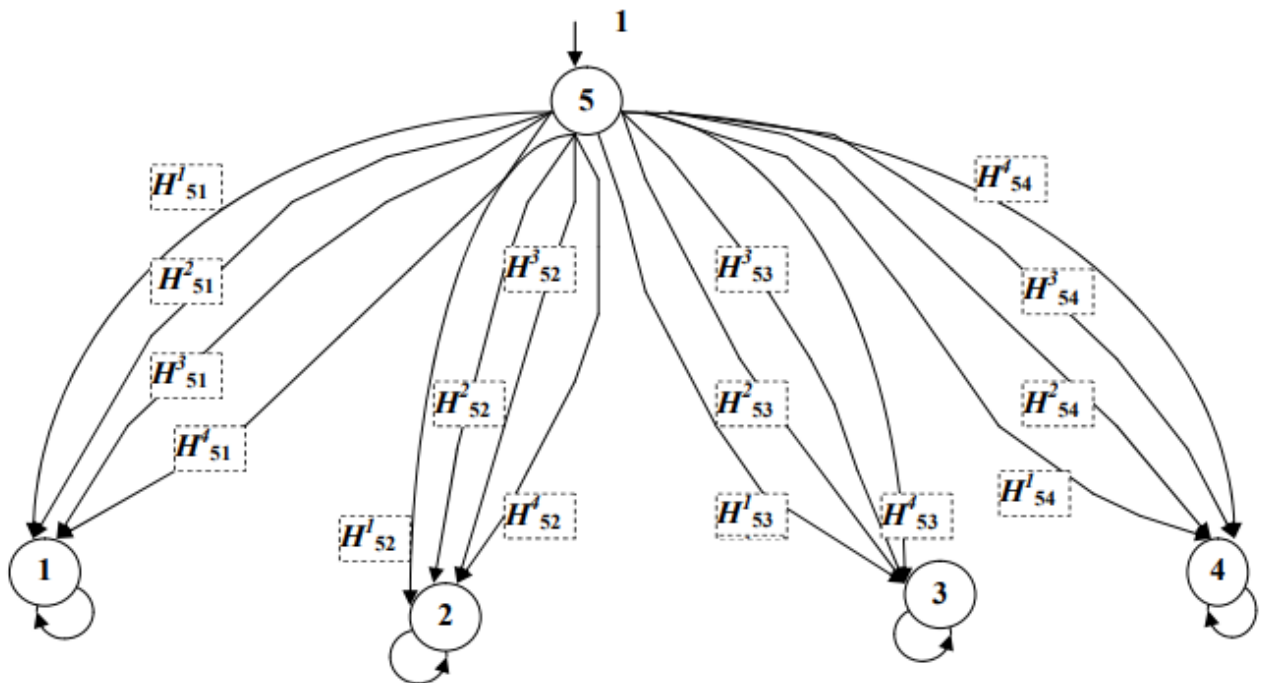


Рисунок Г.7 - Еквівалентний імовірнісний граф після видалення проміжних вершин 6, 7, 8, 9 і 10

Об'єднаймо паралельні дуги, отримаємо остаточний вигляд графа (рис. Г.8).

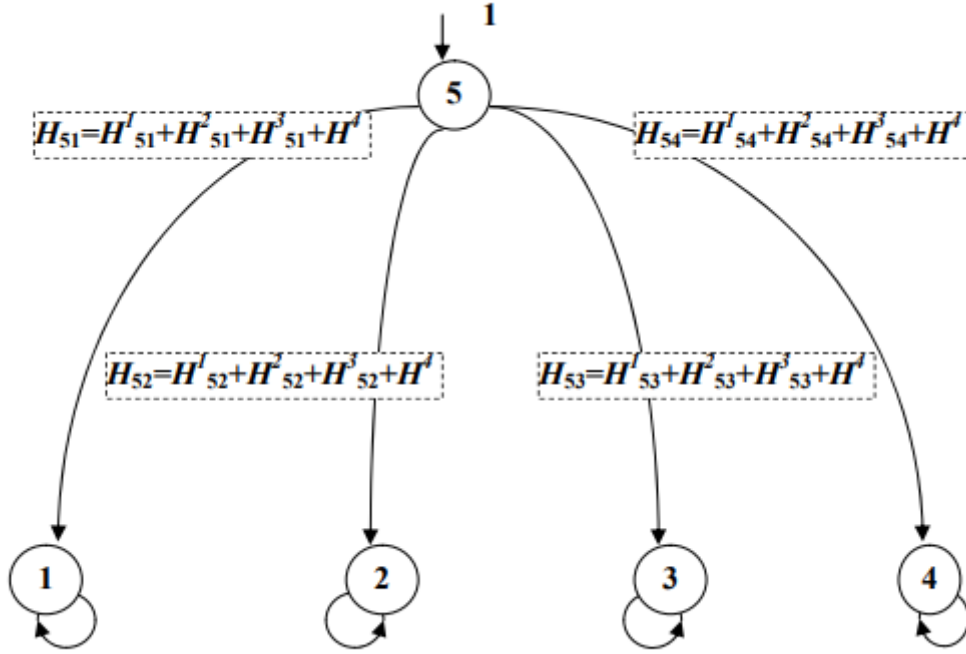


Рисунок Г.8 - Підсумковий імовірнісний граф

Н-функції графа приймають вид:

$$\begin{aligned}
 H_{51} &= H_{61} \cdot H_{56} + H^*_{101} \cdot (H_{56} \cdot H_{610} + H_{57} \cdot H_{710} + H_{58} \cdot H_{810} + H_{59} \cdot H_{910}); \\
 H_{52} &= H^*_{102} \cdot (H_{56} \cdot H_{610} + H_{57} \cdot H_{710} + H_{58} \cdot H_{810} + H_{59} \cdot H_{910}); \\
 H_{53} &= H^*_{103} \cdot (H_{56} \cdot H_{610} + H_{57} \cdot H_{710} + H_{58} \cdot H_{810} + H_{59} \cdot H_{910}); \\
 H_{54} &= H_{59} \cdot H_{94} + H^*_{104} \cdot (H_{56} \cdot H_{610} + H_{57} \cdot H_{710} + H_{58} \cdot H_{810} + H_{59} \cdot H_{910}). \quad (\Gamma 9)
 \end{aligned}$$

На підставі отриманих Н-функцій можна визначити ймовірні характеристики шляхом підстановки параметра $s = 0$. Введемо позначення:

$$\begin{aligned}
 a &= H_{56} \cdot H_{610} + H_{57} \cdot H_{710} + H_{58} \cdot H_{810} + H_{59} \cdot H_{910} = B^1_{p1} \cdot B^1_{p2} \cdot (K^{11}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{10}_2 \cdot K^{10}_1 + \\
 &+ K^{11}_2 \cdot K^{10}_1) + B^1_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot (K^{11}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_2 \cdot K^{10}_1 + K^{11}_2 \cdot K^{10}_1) + B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot (K^{00}_1 \cdot K^{00}_2 + \\
 &+ K^{00}_2 \cdot K^{01}_1 + K^{01}_2 \cdot K^{00}_1) = \\
 &= \sum_{\substack{l=0,1 \\ k=0,1}} (B^1_{p1} \cdot B^k_{p2} \cdot \sum_{\substack{i=0,1 \\ j=0,1}} K^{li}_1 \cdot K^{kj}_2) \quad (\Gamma 10)
 \end{aligned}$$

де $(i=1) \cap (j=1) = \emptyset$.

$$H^*_{101} = H_{101} \cdot \frac{1}{1-b} = B^1_{p1} \cdot B^1_{p2} \cdot B^1_{d1} \cdot B^1_{d2} \cdot K^{11}_1 \cdot K^{11}_2 \cdot \frac{1}{1-b};$$

$$H_{51} = B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^1 \cdot K_1^{11} \cdot K_2^{11} + B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^1 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 \cdot K_1^{11} \cdot K_2^{11} \cdot \frac{1}{1-b} \cdot a;$$

$$H_{51} = B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^1 \cdot K_1^{11} \cdot K_2^{11} \left(1 + B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 \cdot \frac{a}{1-b} \right), \quad (\Gamma 11)$$

де H_{51} - ймовірність безпомилкового виконання структури. Використовуючи формули (Г.4), отримаємо вирази для визначення ймовірності виконання структури з першою помилкою, ймовірності виконання структури з другою помилкою і ймовірності виконання ТФС з першою і другою помилкою.

$$H_{52} = (B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 \cdot K_1^{11} \cdot K_2^{01} + B_{p1}^1 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^0 \cdot K_1^{11} \cdot K_2^{01}) \cdot \frac{a}{1-b};$$

$$H_{52} = (B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 + B_{p1}^1 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^0) \cdot K_1^{11} \cdot K_2^{01} \cdot \frac{a}{1-b}; \quad (\Gamma 12)$$

де H_{52} - ймовірність виконання ТФС з другою помилкою.

$$H_{53} = (B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^1 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 \cdot K_2^{11} \cdot K_1^{01} + B_{p2}^1 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^0 \cdot K_2^{11} \cdot K_1^{01}) \cdot \frac{a}{1-b};$$

$$H_{53} = (B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^1 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 + B_{p2}^1 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^0) \cdot K_2^{11} \cdot K_1^{01} \cdot \frac{a}{1-b}; \quad (\Gamma 13)$$

де H_{53} - ймовірність виконання ТФС з першою помилкою.

$$H_{54} = (B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 + B_{p1}^0 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^0 + B_{p2}^0 \cdot B_{d1}^0 \cdot B_{d2}^1 + B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^0 + B_{d1}^0 \cdot B_{d2}^0) \cdot K_2^{01} \cdot K_1^{01} \cdot \frac{a}{1-b}; \quad (\Gamma 14)$$

де H_{54} - ймовірність виконання структури з першою і другою помилкою.

Математичне сподівання часу виконання заданої ТФС визначається за формулою:

$$M(T) = M(T_p) + M(T_k) + [M(T_p) + M(T_d) + M(T_k)] \cdot \frac{a}{1-b}. \quad (\Gamma 15)$$