

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК  
СЕКЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРОЕКТУВАННЯ

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

**на тему: «Моделі оцінки і оптимізації діяльності операторів систем  
обробки інформації і управління»**

за напрямом підготовки 6.050101 «Комп'ютерні науки»

**Виконавець роботи:** студент групи ІТ-51 Михайленко Юлія Сергіївна

**Кваліфікаційна робота бакалавра  
захищена на засіданні ЕК  
з оцінкою**

\_\_\_\_\_ «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

Науковий керівник

\_\_\_\_\_

(підпис)

д.т.н., проф. Лавров Є.А.  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Голова комісії

\_\_\_\_\_

(підпис)

Шифрін Д.М.  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Суми-2019

Сумський державний університет  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерних наук  
Секція інформаційних технологій проектування  
Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»  
Освітньо-професійна програма «Інформаційні технології проектування»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Зав. секцією ІТП

\_\_\_\_\_ В. В. Шендрик  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ**

*Михайленко Юлія Сергіївна*

**1 Тема роботи** Моделі оцінки і оптимізації діяльності операторів систем обробки інформації і управління

**керівник роботи** Лавров Євгеній Анатолійович, д.т.н., професор,

затверджені наказом по університету від «17» травня 2019 р. № 084-III

**2 Строк подання студентом роботи** «10» червня 2019 р.

**3 Вхідні дані до роботи** \_\_\_\_\_

Літературні джерела з питань розроблення моделей для типових функціональних структур, типові функціональні структури та їх ймовірнісні характеристики.

**4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** \_\_\_\_\_

Аналіз методів моделювання людини оператора в автоматизованих системах, і постановка задачі, Моделювання процесу розробки математичних моделей, Розробка моделей і інформаційної технології для оцінювання надійності операторської діяльності з урахуванням помилок різних типів, Комп'ютерне моделювання процесів виникнення і усунення помилок людини-оператора.

**5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)** \_\_\_\_\_

Актуальність, аналіз методів моделювання, постановка задачі, розроблення моделей для типових функціональних структур, комп'ютерне моделювання, впровадження, апробація, висновки.

**6. Консультанти розділів роботи:**

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

**7. Дата видачі завдання** \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Ідентифікація ідеї проекту	15.04.19-16.04.19	
2	Аналіз методів моделювання діяльності людини-оператора	17.04.19-19.04.19	
3	Постановка задачі та планування робіт	20.04.19-26.04.19	
4	Розроблення принципів моделювання	02.05.19-05.05.19	
5	Розроблення моделей	06.05.19-17.05.19	
6	Проведення комп'ютерного моделювання	20.05.19-29.05.19	
7	Створення документації	22.04.19-31.05.19	
8	Задача пояснювальної записки	10.06.19	
9	Презентація проекту	18.06.19	

**Студент**

\_\_\_\_\_

(підпис)

Михайленко Ю.С.

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_

(підпис)

д.т.н., проф. Лавров Є.А.

## РЕФЕРАТ

Тема бакалаврської роботи: «Моделі оцінки і оптимізації діяльності операторів систем обробки інформації і управління».

Пояснювальна записка містить вступ, 4 розділи, висновки, додатки та список літератури, включає 112 сторінок, 9 таблиць, 36 ілюстрацій, 33 джерела.

В першому розділі наведений аналіз методів моделювання людини-оператора в автоматизованих системах управління та обрано метод, який є основою для побудови моделей. Крім того, формулюються мета, задачі та обираються засоби реалізації.

Другий розділ призначений для опису процесу розробки математичних моделей. В даному розділі будуються контекстна і дочірня діаграми методології IDEF0.

Третій розділ включає в себе розробку принципів моделювання та створення моделей для типових функціональних структур з урахуванням можливості виникнення і усунення помилок різних типів. Створюється оптимізаційна модель, яка дозволяє обрати найкращий варіант виконання операції з мінімальною кількістю збитків та обмеженістю в часі.

У четвертому розділі проводиться комп'ютерне моделювання на прикладі функціональної структури та обирається оптимальний варіант її виконання.

Результатом проведеної роботи є розроблені математичні моделі і інформаційна технологія для моделювання надійності людино-машинної взаємодії в автоматизованих системах управління з урахуванням можливості виникнення і усунення помилок різних типів.

Ключові слова: автоматизована система, ергономіка, людина-оператор, функціональна структура, надійність, оптимізація.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	9
1.1. Методи опису і оцінки процесів людино-машинної взаємодії .....	9
1.2. Методологія розробки математичних моделей для типових функціональних структур людино-машинної взаємодії .....	14
1.3. Мета та задачі .....	20
1.4. Вибір засобів реалізації .....	21
2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ.	22
3. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ І ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ОПЕРАТОРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ З УРАХУВАННЯМ ПОМИЛОК РІЗНИХ ТИПІВ .....	25
3.1. Розробка принципів моделювання .....	25
3.2. Розробка моделей для типових функціональних структур .....	27
3.2.1. Модель оцінки надійності діяльності оператора для типової функціональної структури «Робоча операція з контролем функціонування» .....	27
3.2.2. Модель оцінки надійності діяльності оператора для типової функціональної структури «Послідовне виконання робочих операцій» ..	37
3.2.3. Модель оцінки надійності діяльності оператора для типової функціональної структури «Робоча операція з контролем функціонування, доопрацюванням і повторенням робочої операції» .....	42
3.3. Вибір оптимального варіанту функціонування людино-машинної взаємодії .....	55
4. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИНИКНЕННЯ І УСУНЕННЯ ПОМИЛОК ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА.....	56
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	62

Додаток А. Технічне завдання .....	67
Додаток Б. Планування робіт.....	70
Додаток В. Порівняльний аналіз методів опису і оцінки процесів функціонування людино-машинних систем.....	76
Додаток Г. Типові функціональні одиниці.....	83
Додаток Д. Типові функціональні структури для опису діяльності оператора.....	84
Додаток Е. Копії публікацій.....	87
Додаток Ж. Копії актів впровадження .....	108
Додаток З. Копії дипломів студентських наукових робіт.....	110

## 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.

**Публікації.** За матеріалами дослідження опубліковані 4 наукові роботи. Копії публікацій наведені в додатку Е.

**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
- Копії актів впровадження наведені в додатку Ж.

**Участь у конкурсах студентських наукових робіт.** Робота була переможцем на:

- Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт зі спеціальності «Комп'ютерні науки». (м. Харків, 24-26 квітня 2019 року);
- Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт з Інформаційних технологій (м. Хмельницький, 2019 року);
- Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт з напрямку «Інформатика і кібернетика» (м. Вінниця, 12-13 квітня 2018 року).

Копії дипломів наведено в додатку 3.



# 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

## 1.1. Методи опису і оцінки процесів людино-машинної взаємодії

У зв'язку з бурхливим розвитком автоматизованих систем збільшуються ризики і збитки від помилок людини-оператора [1-5]. Сьогодні велика кількість наук займається описом людинно-машинних систем (ЛМС), які враховують поняття «людського фактору» [6-10]. Наступні формальні системи описують процеси функціонування ЛМС [11-14]:

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

Процес функціонування послідовної алгоритмічної системи за допомогою формальних граматик і відповідних їм автоматів (кінцевих автоматів, машини Тьюринга, лінійно-обмежених автоматів) може бути описаний як процес зміни станів в залежності від зовнішніх впливів.

Для того, щоб описати системи, в яких є паралельно функціонуючі і асинхронно взаємодіючі елементи, використовуються Мережі Петрі [15]. Щоб спроектувати дискретні системи, в яких використовується паралелізм, за допомогою даного апарату вирішуються завдання «якісного» характеру. До таких завдань відносяться: спрощення системи без порушення її загального функціонування, виявлення потенційно вузьких місць і аварійних ситуацій (взаємне блокування процесів).

Послідовні алгоритмічні системи можуть бути описані за допомогою алгоритмічних моделей (алгоритмічної алгебри Глушкова, граф-схем алгоритмів,

схем Янова, логічних схем алгоритмів) [11,16], але вони не можуть бути використані при описі систем з паралельно функціонуючими елементами.

Структурно-алгоритмічний метод аналізу і синтезу діяльності професора Суходольського Г.В. [18] дозволяє синтезувати узагальнену модель індивідуальної і колективної діяльності у вигляді абстрактного графа діяльності, що має вигляд стохастичного мультиграфа. Процедура синтезу передбачає елементи формалізації шляхом представлення графів кожної реалізації в матричній формі. Дозволяє здійснювати раціоналізацію панелей пульта управління і вирішувати інші завдання ергономічного проектування. До обмежень методу відносяться орієнтація на формалізацію тільки дій людини, а не всього процесу функціонування системи, а також відсутність можливості опису паралельних процесів.

Методи теорії ситуаційного управління [19], призначені для опису процесів функціонування складних систем на семантичному рівні, дозволяють описувати також процеси прийняття рішень.

У всіх перерахованих вище методах не можна кількісно оцінити показники функціонування ЕТС, що є значним недоліком.

Функціональна мережа (ФМ) використовується в узагальненому структурному методі, який є основою функціонально-структурної теорії (ФСТ), в якості апарата для опису алгоритмів функціонування [20]. Крім того, що ФМ може описувати процеси виконання, вона може бути використана при описі процесів прийняття рішень. Порівнюючи з мережевими методами, процес функціонування в апараті ФМ може бути представлений не тільки графом подій, а і графом робіт: операції – це вершини орграфа, а дуги - відносини між операціями.

В апараті ФМ для того, щоб описати алгоритми функціонування (АФ), застосовуються типові функціональні одиниці (ТФО). До них входять функціонери, які описують реальні дії та операції, і композиціонери (фіктивні операції), які є необхідними для того, щоб встановити логіко-функціональні зв'язки між функціонерами.

Введення в алфавіт апарату ФМ операцій контролю функціонування і працездатності дозволяє, на відміну від інших мережевих методів, моделювати процеси втрати стійкості процесу функціонування через помилки і відмови. ФМ можуть описувати циклічні процеси, петлі, як з обмеженням на число повторень, так і без них. Логіка виконання паралельних операцій ширше, ніж в GERT, і дозволяє реалізувати функції алгебри логіки «І», «АБО-вкл.», «АБО- викл» як по входу, так і по виходу паралельної структури. Для проведення кількісної оцінки показників якості і надійності функціонування в апараті ФС отриманий набір аналітичних виразів для найпоширеніших структур, так званих типових функціональних структур (ТФС), що спрощує процедуру оцінки ФМ. Номенклатура описуваних показників в апараті ФМ включає цілий ряд системних показників, що характеризують, крім тимчасових, також надійнісні і ресурсно-вартісні показники.

У роботах Лаврова Є.А. розроблені моделі для оцінки якості виконання алгоритмів функціонування при різних варіантах організації, а також поставлено і вирішено комплекс оптимізаційних завдань ергономічного проектування [21-27].

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

Розрахунок якості, ефективності і надійності ергатичних систем (систем «людина -техніка») проводиться з метою оцінки рівня якості, ефективності і надійності системи за допомогою обчислення кількісних значень показників, обраних або встановлених для даного типу системи.

Значення показників якості, ефективності і надійності ергатичних системи, які попередньо обчислювалися, можуть застосовуватись:

- для того, щоб перевірити, чи відповідає рівень якості, ефективності і надійності проекрованої системи нормам;
- для того, щоб оцінити вплив ергатичних ланок на якість, ефективність і надійність системи в загалі;

- для того, щоб оцінити, чи доцільно вводити організаційно-технічні заходи для підвищення якості, ефективності, надійності ергатичних ланок або системи в загалі;
- для того, щоб обґрунтовано вибрати організаційно-технічну структуру ергатичної системи і інші завдання ергономічного проектування;
- в якості одної зі складових для обчислення показників якості, ефективності і надійності системи, яка містить розглянуту ергатичну систему.

Розроблені в функціонально-структурній теорії професора Губинського А.І. [20,28] 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. При цьому єдиним алгоритмом описується функціонування ергатичних системи в цілому, тобто діяльність фахівця або групи фахівців і операції, що виконуються технічними засобами (ЕОМ та ін.). [29]

Математичними моделями цього класу систем є стохастичні мережі з петлями і циклами (поглинаючі напівмарковських ланцюги з довільними законами розподілу часу між переходами).

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 Г. Обчислення показників ефективності, якості і надійності проводиться за допомогою формул, наведених для комбінацій, які зустрічаються найбільш часто. [29]

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. [29]

Для того, щоб оцінити показники якості, ефективності і надійності ергатичних систем необхідно врахувати 3 групи показників.

Група результуючих показників представляє результат розрахунку і служить оціночною для ергатичної системи для окремої функції або в цілому:

$\pi$  - ймовірність виконання функції без помилки;

$\theta$  - ймовірність виконання функції своєчасно;

$\varphi$  - ймовірність виконання функції без помилки і своєчасно;

$T$  – час на виконання функції;

$U$  - дохід, який отримано від виконання функції;

Група вихідних показників відповідає конкретній першій операції, яка включається в склад функції. На їх основі обчислюються результуючі показники. Вихідні показники призначаються експериментально.

$\beta_i$  - ймовірність того, що  $i$ -а операція буде виконана без помилки (з помилкою);

$T_i$  - час, за який виконується  $i$ -а операція;

$r_i$  - дохід, який отримано при виконанні  $i$ -ї операції.

Група проміжних показників утворюється при розрахунку показників для типових груп операцій (типових функціональних структур) за допомогою редукції [12,30,31]:

$\beta_s$  - еквівалентна ймовірність виконання без помилки (з помилкою), що відноситься до типової функціональної структури (ТФС);

$T_s$  - еквівалентний час, за який виконується типова функціональна структура;

$U_s$  - еквівалентний дохід, який отримано при виконанні типової функціональної структури.

Для розрахунку ТФС, в яких є цикли (повторення однієї або більше операцій, які містяться в типовій функціональній структурі), необхідно ввести ряд їх змін:

а) накопичені ймовірності – у тому випадку, якщо кількість циклів фіксована [дорівнює  $l$  незалежно від результатів кожного циклу:  $T_s(l)$ ,  $\beta_s(l)$ ,  $U_s(l)$ ];

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

в) середні від циклів ймовірності – у тому випадку, якщо гранична кількість циклів обмежена (дорівнює  $m$ ), а закінчення повторення трапляється при 1-ому виході, яке визнане вдалим:  $M[U_s(m)]$  і  $D[U_s(m)]$ ,  $M[T_s(m)]$ , і  $D[T_s(m)]$ ,  $M[\beta_s(m)]$  і  $D[\beta_s(m)]$ . ТФС наведені в додатку Д.

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

Для того, щоб отримати кінцевий набір формул для безлічі ТФС необхідно виконати процедуру переходу від "графа робіт", відповідного ТФС, до "графу подій" [13,28] (рис. 1.1). Поглинаючи вершини, які відповідають станам, є вершини "1" і "2", де "1" відповідає виконанню алгоритму функціонування (АФ) без помилки, "2" - виконанню АФ з помилкою, "4" і "5" є проміжними вершинами. [29]

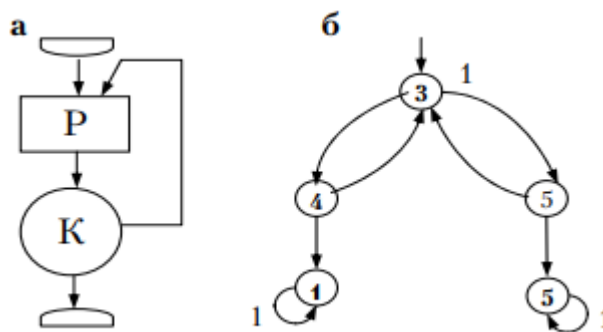


Рисунок 1.1 – ТФС «Робоча – контроль функціонування». Граф робіт (а), граф подій (б).

Для того, щоб мати можливість надалі розвинути модель на випадок врахування можливості помилок різних типів, необхідно розглянути цю технологію, яка розроблена для випадку бінарних моделей помилок. [13, 28, 29]

За допомогою імовірнісного графа  $G(X, Z)$ , в якому вершини – це події початку і закінчення виконуваних операцій, а дуги відповідають можливим переходам ( $Z$  - множина дуг), може бути побудована модель оцінки АФ людино-машинних систем.

Для виконання завдання аналізу алгоритму функціонування ЛМС, заданого на імовірнісному графі  $G(X, Z)$ , необхідно зробити перетворення типу:

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

де  $G(X^*, Z^*)$  - це збільшений імовірнісний граф, де немає проміжних вершин; ваги дуг, які спрямовані з початкової вершини, що відповідає прийняттю рішення про початок процесу функціонування, в поглинаючі вершини, представлені у вигляді функціональних залежностей від ваг дуг вихідного графа  $G(X, Z)$ , що дає можливість обчислювати витрати і ймовірності, які пов'язані з переходами з початкової в поглинаючі вершини. [29]

Поняття Н-функції є основою для використання методу збільшення імовірнісних графів [13,32]. Введемо, що імовірнісний граф – це  $G(X, Z)$ . Значення ненульової ймовірності  $p_{ij}$  переходу  $i \rightarrow j$ , яка є рівнем виконання деякого елемента процесу функціонування правильно (без помилки), ставиться для кожної дуги імовірнісного графа. Для всіх  $i \in X$  виконується рівність  $\sum_j p_{ij} = 1$ . Випадкова величина  $t_{ij}$  витрат (час, вартість), пов'язана з переходом  $i \rightarrow j$ , ставиться у відповідність кожній дузі  $(i, j) \in Z$ . Величина  $t_{ij}$  має функцію розподілу  $F_{ij}(t)$  з щільністю  $f_{ij}(t)$ , математичне очікування  $M_{ij}$  і дисперсію  $D_{ij}$ . Випадкові величини  $t_{ij}$  приймаються незалежними для всіх дуг  $(i, j) \in Z$ . [29]

Н-функція дуги  $(i, j) \in Z$  – це величина, що визначається таким чином:

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

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

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

На основі Н-функції, 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 для зворотного перетворення Лапласа.

Зокрема, на рисунку 1.2,а,б,в зображена схема зменшення розмірності графа для графу робіт, якій зображений на рис. 1.1 і графу подій - на рис. 1.1,б, та якому відповідає типова функціональна структура "робоча - контроль функціонування", в якій немає обмежень на допустиму кількість циклів контролю  $m = \infty$ . [29]

За рахунок транзитивних вершин 4 і 5, при видаленні яких утворюються однорідні петлі при вершині 3 (рис. 1.2,а,б), може бути скорочена розмірність графа (рис. 1.1,б).

Збільшений граф, який не містить проміжних вершин (рис. 1.2,в), отримаємо після видалення необмежених петель при вершині 3. [29]

Нижче показані вирази для Н-функцій початкового і еквівалентних графів.



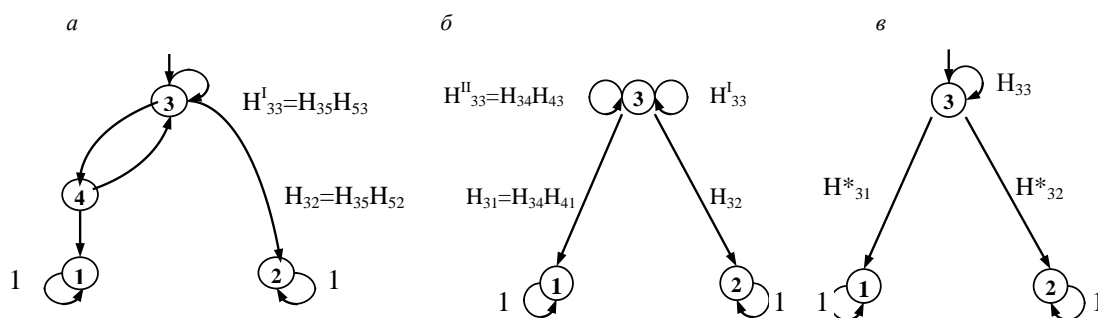


Рисунок 1.2 – Схема зменшення розмірності графа (для ТФС рис. 1.1).

Алгебра Н-функцій складається з правил, за допомогою яких можна знайти Н-функцію дуг збільшеного графа  $G(X^*, Z^*)$  використовуючи Н-функції дуг початкового графа  $G(X, Z)$ . Крім того, розглядаються правила для щільності розподілів витрат ресурсів, їх математичних очікувань і ймовірностей [29]. До алгебри Н-функцій входять три основні правила еквівалентних заміни в імовірнісному графі [13,32], які впливають з наступних тверджень:

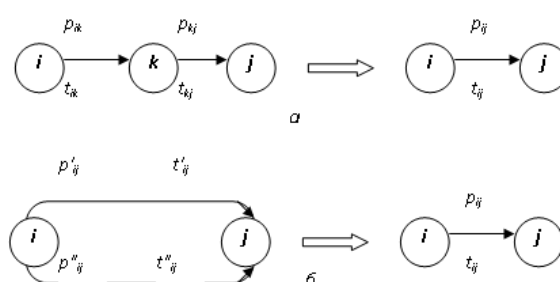


Рисунок 1.3 – Об'єднання послідовних (а) і паралельних дуг (б)

Твердження 1. Правило об'єднання послідовних дуг (рис. 1.3, а). Фрагмент імовірнісного графа, що складається з двох послідовних дуг, може бути замінений однією еквівалентною дугою, ваги якої обчислюються за формулами:

$$H_{ij}(s) = H_{ik}(s) * H_{kj}(s);$$

$$p_{ij} = p_{ik} * p_{kj};$$

$$M_{ij} = M_{ik} + M_{kj}.$$

Твердження 2. Правило видалення паралельних дуг (рис. 1.3, б). Фрагмент імовірнісного графа, що складається з двох паралельних дуг, може бути замінений однією еквівалентною дугою, ваги якої обчислюються за формулами:

$$H_{ij}(s) = H'_{ij}(s) + H''_{ij}(s);$$

$$p_{ij} = p'_{ij} + p''_{ij};$$

$$M_{ij} = \frac{p'_{ij} M'_{ij} + p''_{ij} M''_{ij}}{p'_{ij} + p''_{ij}}.$$

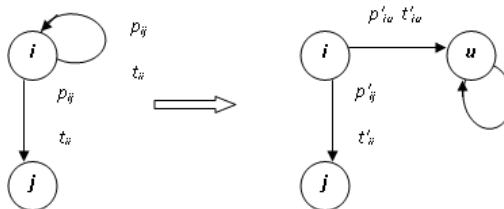


Рисунок 1.4 – Видалення кінцевої дуги – петлі

Твердження 3. Правило видалення кінцевої дуги-петлі (рис. 1.4). Фрагмент імовірнісного графа, що містить кінцеву дугу-петлю з обмеженням  $m$  на число циклів, є еквівалентним графу, в якому дуга - петля  $(i, i)$  замінена дугою  $(i, u)$  в додатково введено поглинаючу вершину. Обчислення ваг дуг здійснюється за формулами:

$$H'_{ij} = H_{ij}(s)(1 - [H_{ii}(s)]^m)/(1 - H_{ii}(s));$$

$$H_{iu}(s) = [H_{ii}(s)]^m;$$

$$p'_{ij} = p_{ij} (1 - (p_{ii})^m)/(1 - p_{ii});$$

$$p'_{iu} = (p_{ii})^m;$$

$$M'_{ij} = M_{ij} + p_{ii} M_{ii} [1/(1 - p_{ii}) - m(p_{ii})^{m-1}/(1 - (p_{ii})^m)];$$

$$M'_{iu} = m M_{ij}.$$

В обчисленнях, що стосуються тверджень 1, 2 і 3, формули для ймовірності переходу  $p_{ij}$ , математичного очікування  $M_{ij}$  можна замінити на зазначені вище формули (2) і (3), відповідно.

На рисунку 1.1,б зображено імовірнісний граф ТФС "робоча - контроль функціонування" без обмеження на допустиму кількість циклів контролю, для якого матриця Н-функцій має такий вигляд [29]:

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

Відповідно до формули (1) були отримані вирази для Н-функцій:

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

Тут  $B^1(B^0)$  – це ймовірність виконання робочої операції без помилки (з помилкою);  $K^{ij}$  - 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. [29]

Видалення вершини 5 і створення обмеженої однорідної петлі при вершині 3 (рис. 1.2, а) перетворює матрицю до виду:

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

При видаленні вершини 4 (рис. 1.2,б) матриця Н-функцій набуває вигляду:

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

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

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

$$H_{32}^* = H_{32} \frac{1}{1 - H_{33}} = H_{35} H_{52} \frac{1}{1 - (H_{54} H_{43} + H_{35} H_{53})}$$

Ймовірні характеристики структури визначаються шляхом підстановки параметра Н-функції  $s = 0$  на основі отриманих підсумкових Н-функцій і формул (2), (3), (4). [29]

### 1.3. Мета та задачі

У ході виконання роботи було поставлено задачу розроблення моделей для оцінювання і оптимізації надійності людино-машинної взаємодії з урахуванням помилок різних типів.

Метою є розробка математичних моделей і інформаційної технології для моделювання надійності людино-машинної взаємодії в автоматизованих системах управління з урахуванням можливості виникнення і усунення помилок різних типів.

Початкові роботи з аналізу предметної області дали змогу сформулювати основні задачі проекту:

- планування робіт проекту;

- вибір типових функціональних структур (ТФС);
- розроблення принципів моделювання, які враховують помилки різних типів;
- розроблення моделей для кожної ТФС;
- розроблення оптимізаційної моделі вибору найкращого варіанту;
- комп'ютерне моделювання процесів виникнення і усунення помилок різних типів.

#### **1.4. Вибір засобів реалізації**

Для розрахунку ймовірнісних характеристик та візуалізації результатів використовуються програма Microsoft Excel 2010.

Microsoft Excel - це прикладна програма, що входить в Microsoft Office. Excel призначена для обробки інформації за допомогою електронних таблиць. Електронна таблиця - зручний інструмент для вирішення планово - фінансових, бухгалтерських та інженерних задач.

В програмі Excel можна зберігати наступні типи даних:

- цифри
- текст
- дату і час
- логічні значення
- формули

За допомогою Microsoft Excel можна проводити різні обчислення використовуючи формули і функції, вбудовані в Excel; будувати діаграми; оброблювати дані; вирішувати задачі оптимізації; робити статистичний аналіз даних.

Для візуалізації даних у програмі Excel використовуються умовні формати, зведені таблиці, графіки з простих, стовпчастих та кругових діаграм.

## 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Для демонстрації основного процесу розроблення моделей оцінки і оптимізації діяльності операторів систем обробки інформації і управління була створена діаграма IDEF0.

Моделювання процесу починається з побудови контекстної діаграми. На цій діаграмі відображено лише один блок – головна функція. Метою даного завдання є створити моделі, які дозволяють оцінити і оптимізувати діяльність операторів, - це і є основна функція. Для створення моделей необхідно мати методологію розробки моделей для типових функціональних структур, де враховуються помилки одного типу; типові функціональні структури та характеристики кожної функціональної одиниці. Процес контролює технічне завдання, керівник та функціонально-структурна теорія професора Губінського. Для виконання задачі використовується технічне та програмне забезпечення. При завершенні отримуємо математичні моделі та розраховані характеристики функціональної структури. Контекстна діаграма зображена на рисунку 2.1.

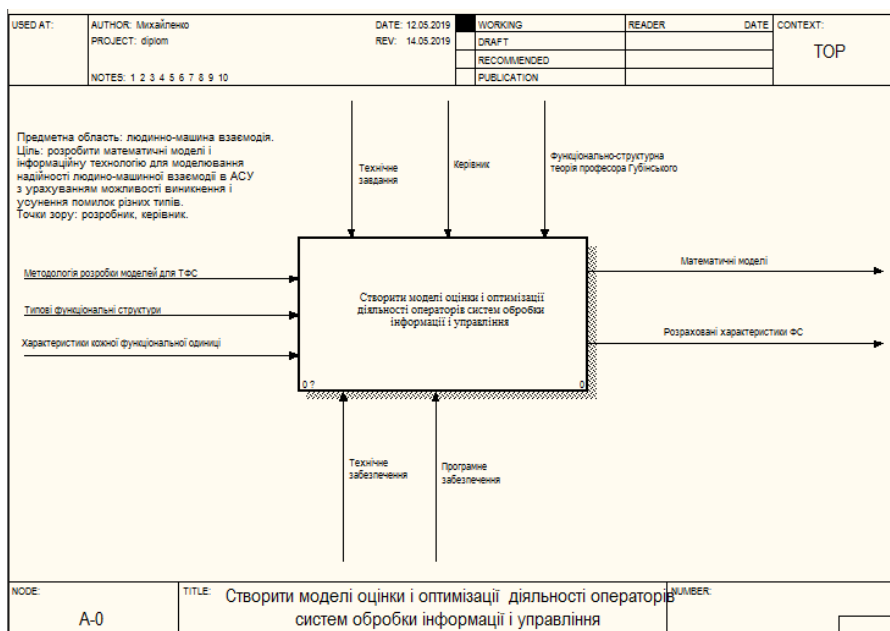


Рисунок 2.1 – Контекстна діаграма

Контекстна діаграма піддається деталізації на іншу діаграму. Отримана діаграма другого рівня містить функціональні блоки, що відображають головні підфункції функціонального блоку контекстної діаграми, і називається дочірньою по відношенню до нього.

Спочатку необхідно розробити принципи моделювання, що враховують помилки різних типів. Вхідною інформацією є методологія розробки моделей, що враховують помилки одного типу. Вихідними даними є створені принципи моделювання. Даний процес контролює технічне завдання, структурно-функціональна теорія професора Губінського та керівник.

Наступним етапом є розроблення математичних моделей для обраних ТФС. Вихідними даними будуть створені моделі для обраних ТФС. Процес контролює розроблені раніше принципи моделювання, технічне завдання, структурно-функціональна теорія професора Губінського та керівник.

Далі необхідно розробити інформаційну технологію, яка б дозволила розрахувати характеристики складної функціональної структури, що складається з декількох типових. Для цього необхідно мати на вході ТФС та створені раніше математичні моделі. Процес контролює технічне завдання, структурно-функціональна теорія професора Губінського та керівник.

Останнім етапом є проведення комп'ютерного моделювання, яке дозволить розрахувати числові характеристики за конкретним прикладом. Для цього необхідно мати наступні вхідні дані: ТФС, числові характеристики кожної функціональної одиниці та інформаційну технологію. Процес контролює технічне завдання та керівник.

Для реалізації кожного етапу необхідне технічне та програмне забезпечення.

На рисунку 2.2 показана дочірня діаграми з усіма підфункціями.

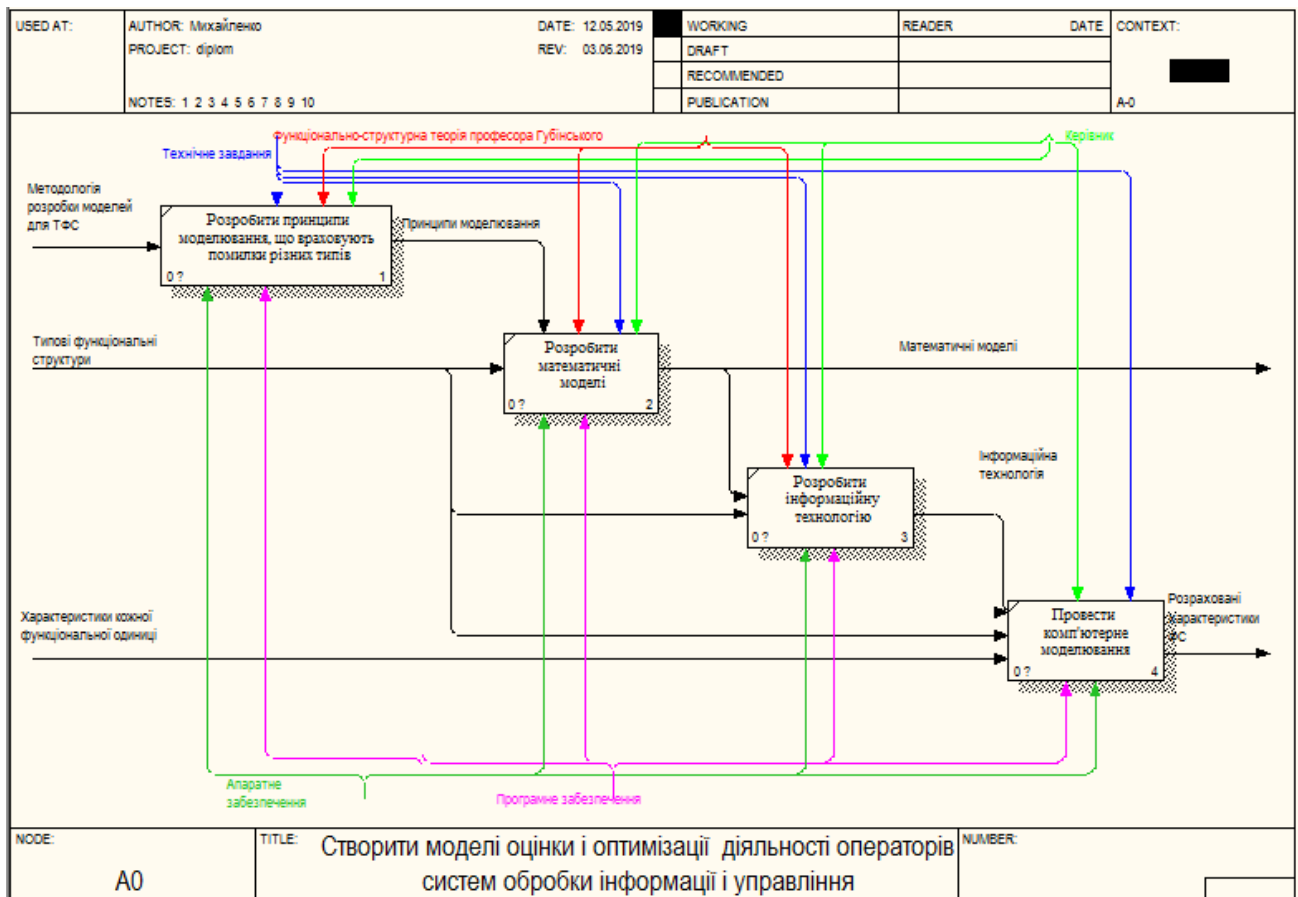


Рисунок 2.2 – Дочірня діаграма



### 3. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ І ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ОПЕРАТОРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ З УРАХУВАННЯМ ПОМИЛОК РІЗНИХ ТИПІВ

#### 3.1. Розробка принципів моделювання

Сформулюємо ряд методологічних принципів, які є основою для методики застосування N-функцій для збільшення ймовірнісних графів ТФС, що враховують помилки різних типів, звертаючи увагу на досвід застосування функціонально-структурної теорії (ФСТ). [29]

Принцип багатовимірності функціональної мережі. При виконанні АФ можуть вноситися, виявлятися і усуватися помилки різних типів. [29]

Принцип множинності результатів реалізації функції ФСТ. Результат виконання функції може мати N-арні наслідки ( $N \geq 2$ ), де N – визначається кінцевим числом помітних станів наслідків виконання функції, які є необхідними для вирішення моделюемого завдання. [29]

Принцип збільшення кількості поглинаючих вершин. На кількість поглинаючих вершин ймовірнісного графа, який відповідає ТФС, впливає кількість різних типів помилок, що вносяться, виявляються і усуваються. На відміну від функціональних мереж, в яких оцінка якості ведеться за бінарним принципом: "немає помилок - є помилки" і, відповідно, ймовірнісний граф має дві поглинаючі вершини, для багатовимірних функціональних мереж ймовірнісний граф типових функціональних структур мають  $N = 2^n$  поглинаючих вершин. Тут n- кількість різних типів помилок. [29]

Після того, як побудований ймовірнісний граф, відповідної ТФС, алгоритм збільшення цього графа з використанням правил збільшення моделей [13] буде складатися з наступних 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.

## 3.2. Розробка моделей для типових функціональних структур

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

Розглянемо алгоритм функціонування, в якому вносяться, виявляються і усуваються помилки двох типів. 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 [29]:

- 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. 3.1. Вершини графа відповідають зазначеним вище подіям. На рис. 3.2,а,б зображені фрагменти вихідного імовірнісного графа, що відображають результати операції контролю (повернення на робочу операцію). Замінімо ці фрагменти графа на рис. 3.1 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 [29]:

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

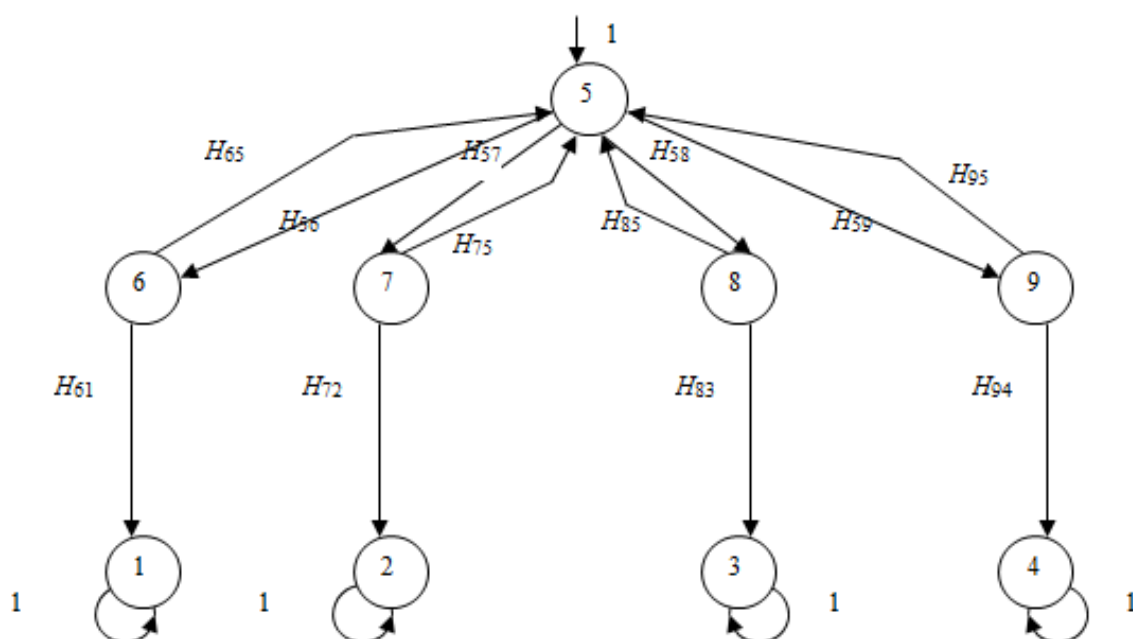


Рисунок 3.1 - Імовірнісний граф ТФС "робоча - контроль функціонування" без обмеження на допустиму кількість  $m$  циклів контролю

$$\left. \begin{aligned}
 H^1_{85} &= K^{00}_1 L[F_k(t)] * K^{11}_2 L[F_k(t)], & H^2_{85} &= K^{00}_1 L[F_k(t)] * K^{10}_2 L[F_k(t)], \\
 H^3_{85} &= K^{01}_1 L[F_k(t)] * K^{10}_2 L[F_k(t)], \\
 H_{85} &= H^1_{85} + H^2_{85} + H^3_{85}, \\
 H^1_{95} &= K^{00}_1 L[F_k(t)] * K^{00}_2 L[F_k(t)], & H^2_{95} &= K^{00}_1 L[F_k(t)] * K^{01}_2 L[F_k(t)], \\
 H^3_{95} &= K^{01}_1 L[F_k(t)] * K^{01}_2 L[F_k(t)], \\
 H_{95} &= H^1_{95} + H^2_{95} + H^3_{95};
 \end{aligned} \right\} (7)$$

$B^1_1$  ( $B^0_1$ ) - ймовірність виконання робочої операції без помилки (з помилкою) першого типу;

$B^1_2$  ( $B^0_2$ ) - 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;

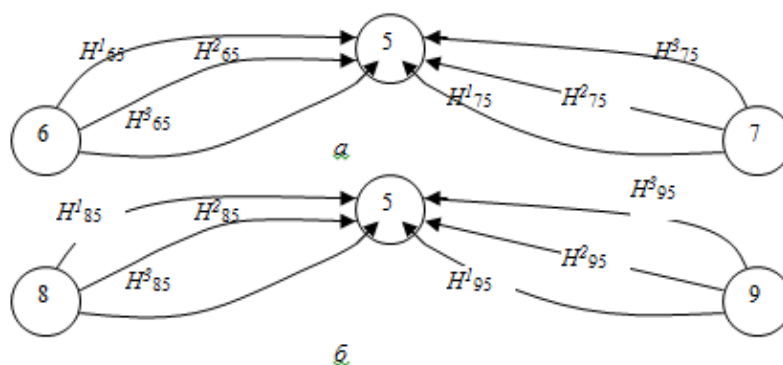


Рисунок 3.2 - Фрагменти імовірнісного графа, що відображають результати операції контролю

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

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

$K_{1(2)}^{01}$  - 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 рисунку 3.2, має вигляд [29]:

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

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. 3.3), а матриця набуває вигляду [29]:

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

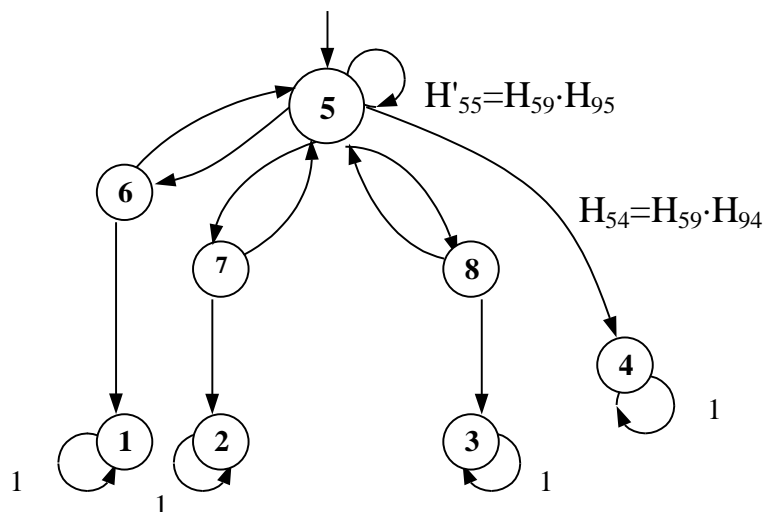


Рисунок 3.3 - Імовірнісний граф після видалення вершини 9

Після видалення вершини 8, в графі, зображеному на рис. 3.3, утворюється друга необмежена ( $m = \infty$ ) петля (рис. 3.4), а розмірність матриці знижується і вона набуває вигляду [29]:

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

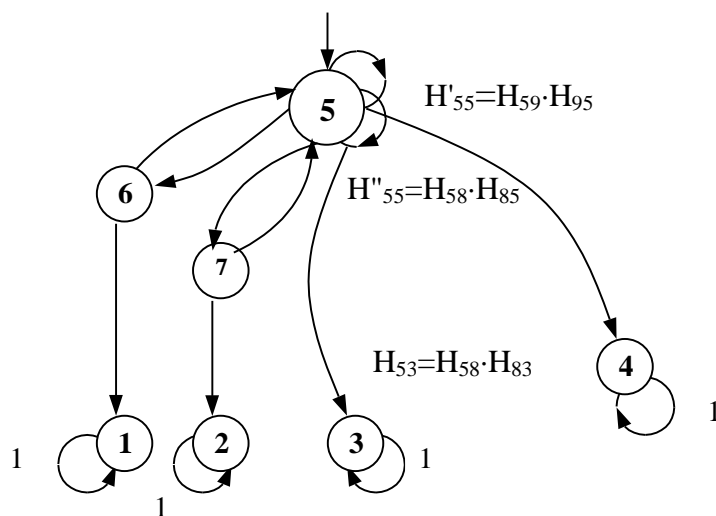


Рисунок 3.4 - Імовірнісний граф після видалення вершини 8

Аналогічним чином видаляються вершини графа 7 і 6, утворюючи при цьому нові дві необмежені петлі з Н-функціями  $H_{55}^{III} = H_{57} \cdot H_{75}$  і  $H_{55}^{IV} = H_{56} \cdot H_{65}$ , відповідно. В результаті отримаємо граф, що має в вершині чотири необмежені петлі (рис. 3.5) [29]. Графу відповідає матриця:

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

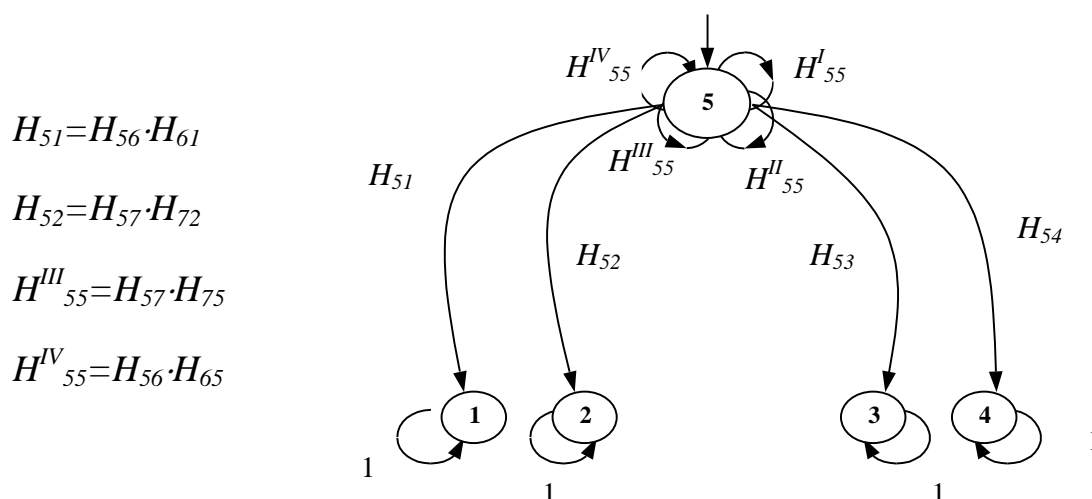


Рисунок 3.5 - Імовірнісний граф після видалення транзитивних вершин

Враховуючи рівноцінність петель при вершині 5, можна замінити їх однією однорідної петлею [29]

$$H_{55} = H^I_{55} + H^{II}_{55} + H^{III}_{55} + H^{IV}_{55}$$

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

Користуючись правилом видалення необмеженої однорідної петлі, отримаємо підсумковий граф (рис. 3.6), для якого Н-функції мають вигляд [29]:



$$\begin{aligned}
 H_{51}^* &= H_{51} \frac{1}{1-H_{55}}, & H_{52}^* &= H_{52} \frac{1}{1-H_{55}}, \\
 H_{53}^* &= H_{53} \frac{1}{1-H_{55}}, & H_{54}^* &= H_{54} \frac{1}{1-H_{55}}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

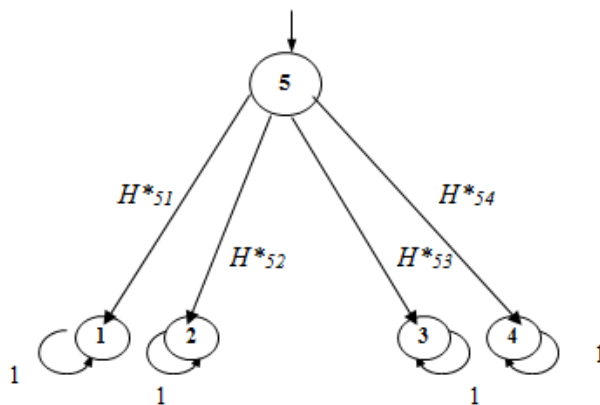


Рисунок 3.6 - Підсумковий імовірнісний граф

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  $s = 0$  [29]:

$V_{\{1,2\}} = H_{51}^*(0)$  - 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.

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

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 [29]:

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

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

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

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 [29]. 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 [29]:

$x = (0,1) - 0(1)$  - є (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 [29]:

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 -  $n$ . [29]

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:  $k = 1, 2, \dots, 2^n$ ;  $m = 1, 2, \dots, n$ . [29]

Тоді результат виконання робочої операції  $i$  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 [29]:

$Q^1 = \{q^1_1, q^1_2, \dots, q^1_{n1}\}$  - 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 [29]:

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

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  $k$

Ймовірність 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). [29]

### **3.2.2. Модель оцінки надійності діяльності оператора для типової функціональної структури «Послідовне виконання робочих операцій»**

Розглянемо типову функціональну структуру «Послідовне виконання робочих операцій», граф-схема якої зображена на рисунку 3.7.

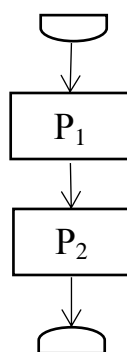


Рисунок 3.7 - Граф робіт ФС «Послідовне виконання робочих операцій»

Для побудови математичної моделі позначимо події, пов'язані з виконанням операцій, що входять в ТФС. Вершини імовірнісного графа (рис. 3.8) 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 першої робочої операції з безпомилковим результатом по першій і другій помилці і перехід до другої робочої операції;
- 7) закінчення виконання першої робочої операції з безпомилковим результатом по першій і помилковим результатом по другій помилці і перехід до другої робочої операції;
- 8) закінчення виконання першої робочої операції з помилковим результатом по першій і безпомилковим результатом по другій помилці і перехід до другої робочої операції;

9) закінчення виконання першої робочої операції з помилковим результатом по першій і помилковим результатом по другій помилці і перехід до другої робочої операції;

На рисунку 3.2 зображений імовірнісний граф даної структури, вершини якого відповідають зазначеним вище подіям.

Н-функції дуг графа, показаного на рисунку 3.8, мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 H_{56} &= B^1_{11}L[F_{p1}(t)] * B^1_{12}L[F_{p1}(t)], & H_{57} &= B^1_{11}L[F_{p1}(t)] * B^0_{12}L[F_{p1}(t)], \\
 H_{58} &= B^0_{11}L[F_{p1}(t)] * B^1_{12}L[F_{p1}(t)], & H_{59} &= B^0_{11}L[F_{p1}(t)] * B^0_{12}L[F_{p1}(t)], \\
 H_{61} &= B^1_{21}L[F_{p2}(t)] * B^1_{22}L[F_{p2}(t)], & H_{62} &= B^1_{21}L[F_{p2}(t)] * B^0_{22}L[F_{p2}(t)], \\
 H_{63} &= B^0_{21}L[F_{p2}(t)] * B^1_{22}L[F_{p2}(t)], & H_{64} &= B^0_{21}L[F_{p2}(t)] * B^0_{22}L[F_{p2}(t)], \\
 H_{72} &= H_{61}, & H_{74} &= H_{63}, & H_{83} &= H_{61}, & H_{84} &= H_{62}, & H_{94} &= H_{61}
 \end{aligned}$$

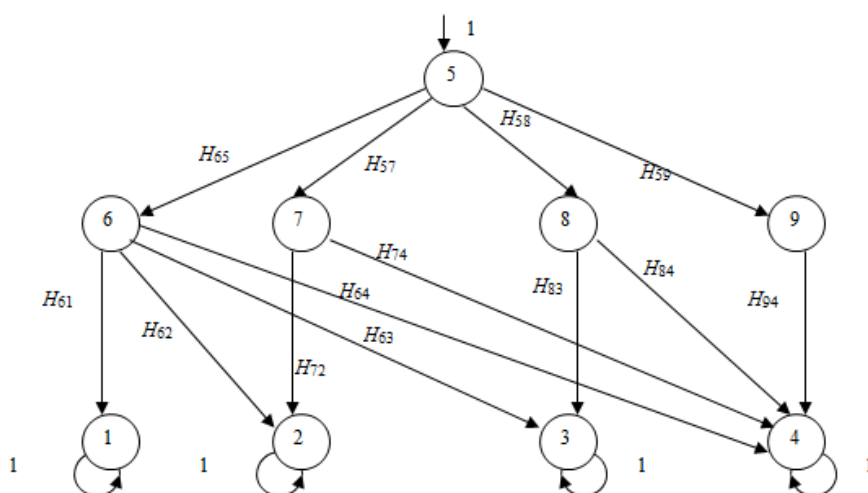


Рисунок 3.8 - Імовірнісний граф ТФС «Послідовне виконання робочих операцій»

Розмірність графа зменшуємо шляхом об'єднання послідовних дуг: (5,6) і (6,1); (5,6) і (6,2); (5,6) і (6,3); (5,6) і (6,4); (5,7) і (7,2); (5,7) і (7,4); (5,8) і (8,3); (5,8) і (8,4); (5,9) і (9,4). Отримаємо еквівалентний граф, зображений на рисунку 3.9. Н-функції дуг графа мають вигляд:

$$\begin{aligned}
H_{51} &= B^l_{11}L[F_{p1}(t)] * B^l_{12}L[F_{p1}(t)] * B^l_{21}L[F_{p2}(t)] * B^l_{22}L[F_{p2}(t)], \\
H^I_{52} &= B^l_{11}L[F_{p1}(t)] * B^l_{12}L[F_{p1}(t)] * B^l_{21}L[F_{p2}(t)] * B^0_{22}L[F_{p2}(t)], \\
H^{II}_{52} &= B^l_{11}L[F_{p1}(t)] * B^0_{12}L[F_{p1}(t)] * B^l_{21}L[F_{p2}(t)] * B^l_{22}L[F_{p2}(t)], \\
H^I_{53} &= B^l_{11}L[F_{p1}(t)] * B^l_{12}L[F_{p1}(t)] * B^0_{21}L[F_{p2}(t)] * B^l_{22}L[F_{p2}(t)], \\
H^{II}_{53} &= B^0_{11}L[F_{p1}(t)] * B^l_{12}L[F_{p1}(t)] * B^l_{21}L[F_{p2}(t)] * B^l_{22}L[F_{p2}(t)], \\
H^I_{54} &= B^l_{11}L[F_{p1}(t)] * B^l_{12}L[F_{p1}(t)] * B^0_{21}L[F_{p2}(t)] * B^0_{22}L[F_{p2}(t)], \\
H^{II}_{54} &= B^l_{11}L[F_{p1}(t)] * B^0_{12}L[F_{p1}(t)] * B^0_{21}L[F_{p2}(t)] * B^l_{22}L[F_{p2}(t)], \\
H^{III}_{54} &= B^0_{11}L[F_{p1}(t)] * B^l_{12}L[F_{p1}(t)] * B^l_{21}L[F_{p2}(t)] * B^0_{22}L[F_{p2}(t)], \\
H^{IV}_{54} &= B^0_{11}L[F_{p1}(t)] * B^0_{12}L[F_{p1}(t)] * B^l_{21}L[F_{p2}(t)] * B^l_{22}L[F_{p2}(t)],
\end{aligned}$$

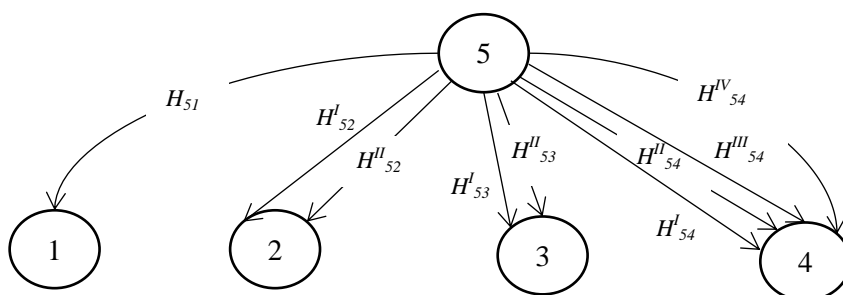


Рисунок 3.9 - Еквівалентний імовірнісний граф після видалення вершин 6, 7, 8 і 9 вихідного графа

Після об'єднання паралельних дуг отримаємо вираз для Н-функцій:

$$\begin{aligned}
H_{52} &= H^I_{52} + H^{II}_{52} = B^l_{11}L[F_{p1}(t)] * B^l_{12}L[F_{p1}(t)] * B^l_{21}L[F_{p2}(t)] * B^0_{22}L[F_{p2}(t)] + \\
&+ B^l_{11}L[F_{p1}(t)] * B^0_{12}L[F_{p1}(t)] * B^l_{21}L[F_{p2}(t)] * B^l_{22}L[F_{p2}(t)] \\
H_{53} &= H^I_{53} + H^{II}_{53} = B^l_{11}L[F_{p1}(t)] * B^l_{12}L[F_{p1}(t)] * B^0_{21}L[F_{p2}(t)] * B^l_{22}L[F_{p2}(t)] + \\
&+ B^0_{11}L[F_{p1}(t)] * B^l_{12}L[F_{p1}(t)] * B^l_{21}L[F_{p2}(t)] * B^l_{22}L[F_{p2}(t)] \\
H_{54} &= H^I_{54} + H^{II}_{54} + H^{III}_{54} + H^{IV}_{54} = B^l_{11}L[F_{p1}(t)] * B^l_{12}L[F_{p1}(t)] * B^0_{21}L[F_{p2}(t)] * \\
&* B^0_{22}L[F_{p2}(t)] + B^l_{11}L[F_{p1}(t)] * B^0_{12}L[F_{p1}(t)] * B^0_{21}L[F_{p2}(t)] * B^l_{22}L[F_{p2}(t)] + \\
&+ B^0_{11}L[F_{p1}(t)] * B^l_{12}L[F_{p1}(t)] * B^l_{21}L[F_{p2}(t)] * B^0_{22}L[F_{p2}(t)] + B^0_{11}L[F_{p1}(t)] * \\
&* B^0_{12}L[F_{p1}(t)] * B^l_{21}L[F_{p2}(t)] * B^l_{22}L[F_{p2}(t)]
\end{aligned}$$

Остаточний вигляд графа показаний на рисунку 3.10.



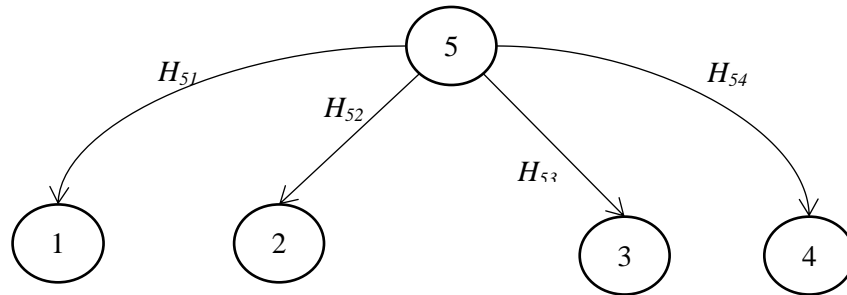


Рисунок 3.10 – Підсумковий ймовірнісний граф

Після спрощення формул отримаємо:

$$H_{51} = B^l_{11} * B^l_{12} * B^l_{21} * B^l_{22};$$

де  $H_{51}$  - ймовірність безпомилкового виконання структури.

$$H_{52} = B^l_{11} * B^l_{12} * B^l_{21} * B^0_{22} + B^l_{11} * B^0_{12} * B^l_{21} * B^l_{22};$$

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

$$H_{53} = B^l_{11} * B^l_{12} * B^0_{21} * B^l_{22} + B^0_{11} * B^l_{12} * B^l_{21} * B^l_{22};$$

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

$$H_{54} = B^l_{11} * B^l_{12} * B^0_{21} * B^0_{22} + B^l_{11} * B^0_{12} * B^0_{21} * B^l_{22} + B^0_{11} * B^l_{12} * B^l_{21} * B^0_{22} + B^0_{11} * B^0_{12} * B^l_{21} * B^l_{22};$$

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

Математичне сподівання часу виконання визначається за формулою:

$$M(T) = M(T_{p1}) + M(T_{p2}).$$

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

Граф-схема зазначеної ТФС зображена на рис. 3.11. [29]

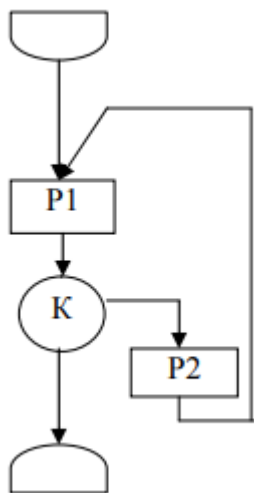


Рисунок 3.11 - Граф робіт циклової ФС «Робоча операція з контролем функціонування, доопрацюванням і повторенням робочої операції».

Для побудови математичної моделі позначимо події, пов'язані з виконанням операцій, що входять в ТФС. Вершини імовірнісного графа (рис. 3.12) відповідають наступним подіям [29]:

- 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. 3.12. Вершини графа відповідають зазначеним вище подіям.

Н-функції дуг графа, показаного на рис. 3.12, мають вигляд [29]:

$$\begin{aligned}
 H_{56} &= B_{p1}^1 \cdot L[F_p(t)] \cdot B_{p2}^1 \cdot L[F_p(t)], & H_{57} &= B_{p1}^1 \cdot L[F_p(t)] \cdot B_{p2}^0 \cdot L[F_p(t)], \\
 H_{58} &= B_{p1}^0 \cdot L[F_p(t)] \cdot B_{p2}^1 \cdot L[F_p(t)], & H_{59} &= B_{p1}^0 \cdot L[F_p(t)] \cdot B_{p2}^0 \cdot L[F_p(t)], \\
 H_{6l} &= K_{1}^{11} \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{2}^{11} \cdot L[F_k(t)], & H_{94} &= K_{1}^{01} \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{2}^{01} \cdot L[F_k(t)], \\
 H_{610} &= K_{1}^{11} \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{2}^{10} \cdot L[F_k(t)] + K_{1}^{10} \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{2}^{10} \cdot L[F_k(t)] + K_{2}^{11} \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{1}^{10} \cdot L[F_k(t)], \\
 H_{710} &= K_{1}^{10} \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{2}^{00} \cdot L[F_k(t)] + K_{2}^{00} \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{1}^{11} \cdot L[F_k(t)] + K_{2}^{01} \cdot L[F_k(t)] \cdot K_{1}^{10} \cdot L[F_k(t)],
 \end{aligned}$$

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

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

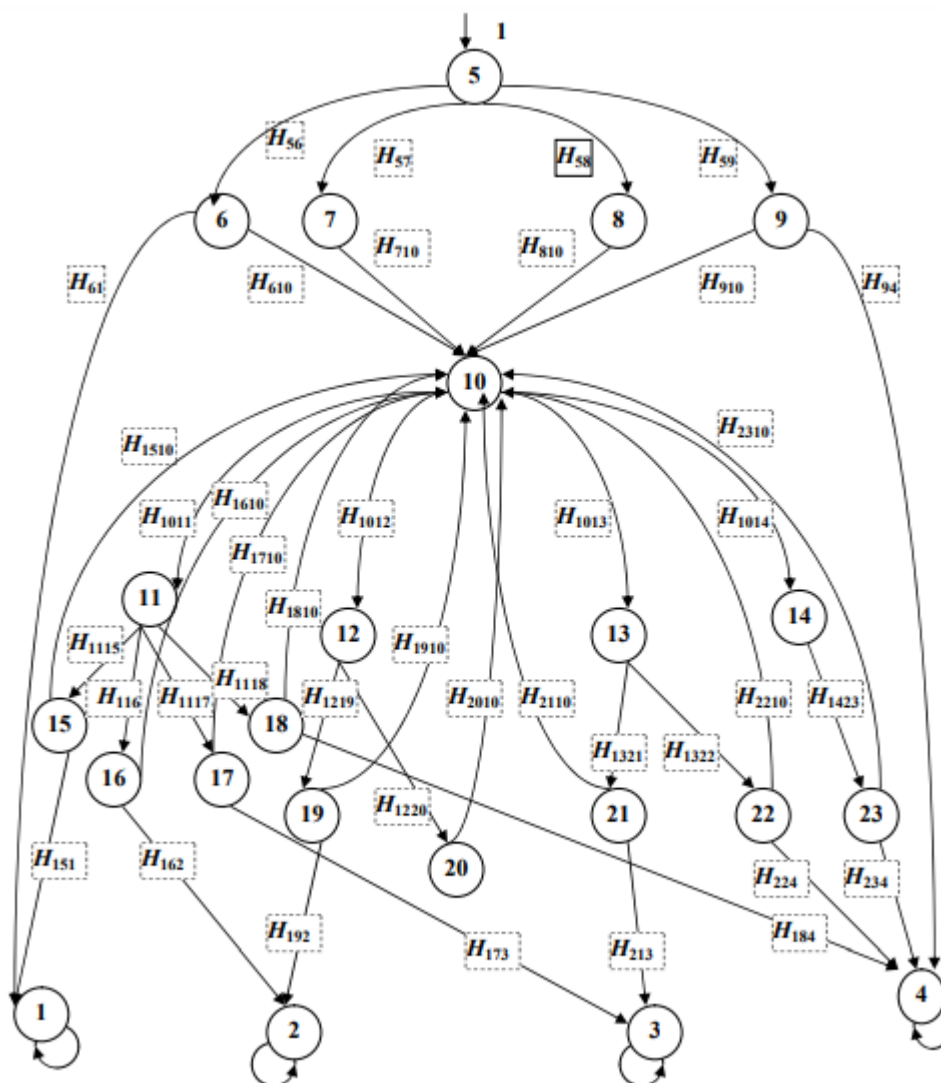


Рисунок 3.12 - Імовірнісний граф ТФС «Робоча операція з контролем функціонування, доопрацюванням і повторенням робочої операції»

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
H_{2110} &= K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{2210} &= K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{2310} &= K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)],
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_{1011} &= B^1_{\partial 1} \cdot L[F_\partial(t)] \cdot B^1_{\partial 2} \cdot L[F_\partial(t)], & H_{1012} &= B^1_{\partial 1} \cdot L[F_\partial(t)] \cdot B^0_{\partial 2} \cdot L[F_\partial(t)], \\
H_{1013} &= B^0_{\partial 1} \cdot L[F_\partial(t)] \cdot B^1_{\partial 2} \cdot L[F_\partial(t)], & H_{1014} &= B^0_{\partial 1} \cdot L[F_\partial(t)] \cdot B^0_{\partial 2} \cdot L[F_\partial(t)], \\
H_{1115} &= B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)], & H_{1116} &= B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)], \\
H_{1117} &= B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)], & H_{1118} &= B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)], \\
H_{1219} &= B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)], & H_{1220} &= B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)], \\
H_{1321} &= B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)], & H_{1322} &= B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)], \\
H_{1423} &= B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)], & H_{151} &= K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{162} &= K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{173} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{184} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{192} &= K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{204} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{213} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{224} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{234} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)]. \quad (16)
\end{aligned}$$

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. 3.13 [29]. Н-функції дуг графа мають вигляд:

$$\begin{aligned}
H_{1110} &= K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] + K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{1210} &= K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{1310} &= K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{1410} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{1510} &= K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{1610} &= K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{1710} &= K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{1810} &= K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{00}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{00}_2 \cdot L[F_k(t)],
\end{aligned}$$

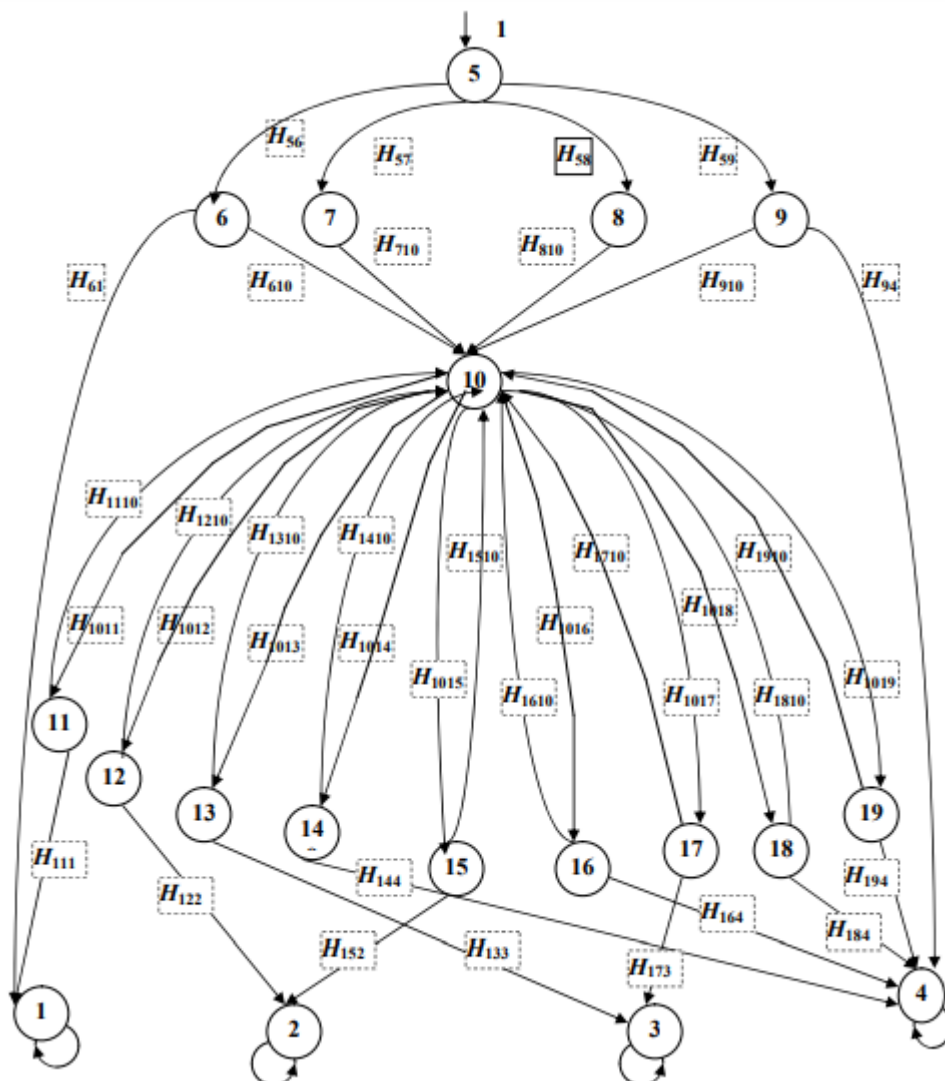


Рисунок 3.13 - Еквівалентний імовірнісний граф після видалення вершин 11, 12, 13 і 14 вихідного графа

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

$$H_{1011} = B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)],$$

$$H_{1012} = B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)],$$

$$H_{1013} = B^0_{p1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)],$$

$$H_{1014} = B^0_{p1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)],$$

$$H_{1015} = B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^0_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)],$$

$$H_{1016} = B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^0_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)],$$

$$H_{1017} = B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)],$$

$$\begin{aligned}
H_{1018} &= B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \\
H_{1019} &= B^0_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^0_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^0_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)], \\
H_{111} &= K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{122} &= K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{133} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{144} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{152} &= K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{164} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{173} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)], \\
H_{184} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)], & H_{194} &= K^{01}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{01}_2 \cdot L[F_k(t)]. \quad (17)
\end{aligned}$$

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. 3.14), Н-функція якої набуває вигляду [29]:

$$\begin{aligned}
H^1_{1010} &= H_{1110} \cdot H_{1011} = \\
&= (K^{11}_1 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] + K^{11}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)] + K^{10}_2 \cdot L[F_k(t)] \cdot K^{10}_1 \cdot L[F_k(t)]) \cdot \\
&\quad \cdot B^1_{p1} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{p2} \cdot L[F_p(t)] \cdot B^1_{\delta 1} \cdot L[F_\delta(t)] \cdot B^1_{\delta 2} \cdot L[F_\delta(t)]. \quad (18)
\end{aligned}$$

Спростимо формулу (Г.3) для визначення  $H^1_{1010}$ :

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

Аналогічно утворюються необмежені петлі при видаленні вершин 12, 13, ..., 19 з Н-функціями відповідно [29]:

$$\begin{aligned}
H^{II}_{1010} &= H_{1210} \cdot H_{1012} = (K^{10}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{11}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_2 \cdot K^{10}_1) \cdot B^1_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^1_{\delta 1} \cdot B^1_{\delta 2}; \\
H^{III}_{1010} &= H_{1310} \cdot H_{1013} = (K^{11}_2 \cdot K^{00}_1 + K^{01}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{10}_2) \cdot B^0_{p1} \cdot B^1_{p2} \cdot B^1_{\delta 1} \cdot B^1_{\delta 2}; \\
H^{IV}_{1010} &= H_{1410} \cdot H_{1014} = (K^{01}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2) \cdot B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^1_{\delta 1} \cdot B^1_{\delta 2}
\end{aligned}$$

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

де  $B^0_{p2} = 1$ ;

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

де  $B_{p2}^0=1$ ;

$$H_{1010}^{VII}=H_{1710} \cdot H_{1017}=(K_{1}^{00} \cdot K_{2}^{10}+K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{10}+K_{1}^{00} \cdot K_{2}^{11}) \cdot B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^1 \cdot B_{\delta 1}^0 \cdot B_{\delta 2}^1,$$

де  $B_{pl}^0=1$ ;

$$H_{1010}^{VIII}=H_{1810} \cdot H_{1018}=(K_{1}^{00} \cdot K_{2}^{01}+K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{00}+K_{1}^{00} \cdot K_{2}^{00}) \cdot B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{\delta 1}^0 \cdot B_{\delta 2}^1,$$

де  $B_{pl}^0=1$ ;

$$H_{1010}^{IX}=H_{1910} \cdot H_{1019}=(K_{1}^{00} \cdot K_{2}^{01}+K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{00}+K_{1}^{00} \cdot K_{2}^{00}) \cdot B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{\delta 1}^0 \cdot B_{\delta 2}^1, \quad (19)$$

де  $B_{pl}^0=1$  и  $B_{p2}^0=1$ .

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). [29]

Отримаємо вираз для H-функцій:

$$\begin{aligned} H_{101} &= H_{1011} \cdot H_{111} = B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^1 \cdot B_{\delta 1}^1 \cdot B_{\delta 2}^1 \cdot K_{1}^{11} \cdot K_{2}^{11}; \\ H_{102}^1 &= H_{1012} \cdot H_{122} = B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{\delta 1}^1 \cdot B_{\delta 2}^1 \cdot K_{1}^{11} \cdot K_{2}^{01}; \\ H_{102}^2 &= H_{1015} \cdot H_{152} = B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{\delta 1}^1 \cdot B_{\delta 2}^0 \cdot K_{1}^{11} \cdot K_{2}^{01} = B_{p1}^1 \cdot B_{\delta 1}^1 \cdot B_{\delta 2}^0 \cdot K_{1}^{11} \cdot K_{2}^{01}; \\ H_{103}^1 &= H_{1013} \cdot H_{133} = B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^1 \cdot B_{\delta 1}^1 \cdot B_{\delta 2}^1 \cdot K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{11}; \\ H_{103}^2 &= H_{1017} \cdot H_{173} = B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^1 \cdot B_{\delta 1}^0 \cdot B_{\delta 2}^1 \cdot K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{11} = B_{p2}^1 \cdot B_{\delta 1}^0 \cdot B_{\delta 2}^1 \cdot K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{11}; \\ H_{104}^1 &= H_{1014} \cdot H_{144} = B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{\delta 1}^1 \cdot B_{\delta 2}^1 \cdot K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{01}; \\ H_{104}^2 &= H_{1016} \cdot H_{164} = B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{\delta 1}^1 \cdot B_{\delta 2}^0 \cdot K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{01} = B_{p1}^0 \cdot B_{\delta 1}^1 \cdot B_{\delta 2}^0 \cdot K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{01}; \\ H_{104}^3 &= H_{1018} \cdot H_{184} = B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{\delta 1}^0 \cdot B_{\delta 2}^1 \cdot K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{01} = B_{p2}^0 \cdot B_{\delta 1}^0 \cdot B_{\delta 2}^1 \cdot K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{01}; \\ H_{104}^4 &= H_{1019} \cdot H_{194} = B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{\delta 1}^0 \cdot B_{\delta 2}^1 \cdot K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{01} = B_{\delta 1}^0 \cdot B_{\delta 2}^1 \cdot K_{1}^{01} \cdot K_{2}^{01}. \end{aligned} \quad (20)$$

Вид імовірнісного графа після видалення транзитивних вершин показаний на рис. 3.14. [29]



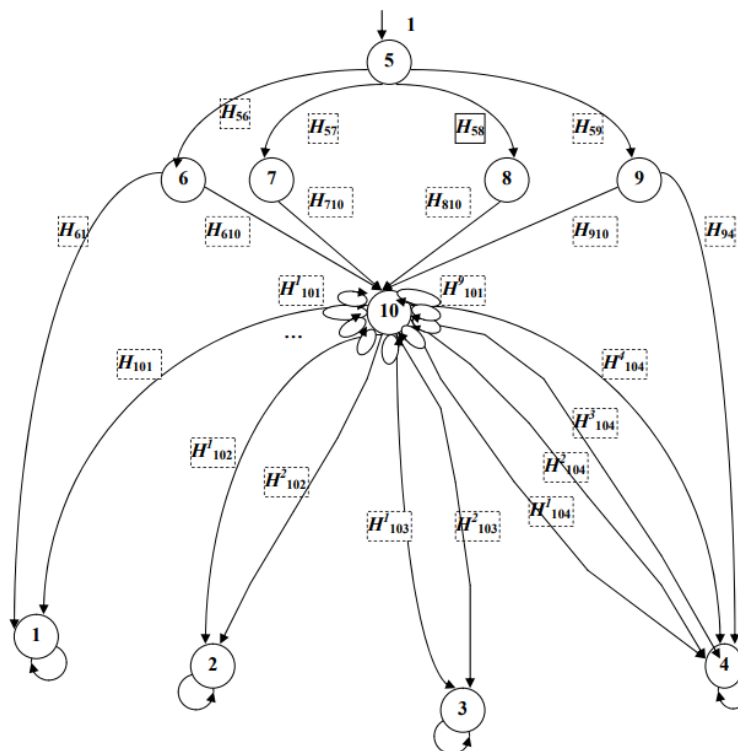


Рисунок 3.14 - Еквівалентний імовірнісний граф після видалення після видалення транзитивних вершин

Замінімо дев'ять петель на одну еквівалентну. Вираз Н-функції для еквівалентної петлі матиме вигляд [29]:

$$\begin{aligned}
 H_{1010} &= H^I_{1010} + H^{II}_{1010} + H^{III}_{1010} + H^{IV}_{1010} + H^V_{1010} + H^{VI}_{1010} + H^{VII}_{1010} + H^{VIII}_{1010} + H^{IX}_{1010} = \\
 &= B^1_{p1} \cdot B^1_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot (K^{11}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{11}_2 \cdot K^{10}_1 + K^{10}_2 \cdot K^{10}_1) + \\
 &+ B^1_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot (K^{10}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{11}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_2 \cdot K^{10}_1) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^1_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot (K^{11}_2 \cdot K^{00}_1 + K^{01}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{10}_2) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot (K^{01}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2) + \\
 &+ B^1_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^0_{\partial 2} \cdot (K^{11}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{10}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{10}_1 \cdot K^{00}_2) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^1_{\partial 1} \cdot B^0_{\partial 2} \cdot (K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{00}_2) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^1_{p2} \cdot B^0_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot (K^{00}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{10}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{11}_2) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^0_{\partial 1} \cdot B^1_{\partial 2} \cdot (K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2) + \\
 &+ B^0_{p1} \cdot B^0_{p2} \cdot B^0_{\partial 1} \cdot B^0_{\partial 2} \cdot (K^{00}_1 \cdot K^{01}_2 + K^{01}_1 \cdot K^{00}_2 + K^{00}_1 \cdot K^{00}_2) =
 \end{aligned}$$

$$= \sum_{\substack{l=0,1 \\ k=0,1 \\ m_1=0,1 \\ m_2=0,1}} ( B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^k \cdot B_{D1}^{m_1} \cdot B_{D2}^{m_2} \cdot \sum_{\substack{i=0,1 \\ j=0,1}} K_1^{li} \cdot K_2^{kj} ) \quad (21)$$

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  $B_{pl}^l=1$ ; якщо  $m_2=0$ , то  $B_{Dl}^l=1$ .

Еквівалентний імовірнісний граф після заміни петель на одну приймає вигляд, показаний на рис. 3.15. [29]

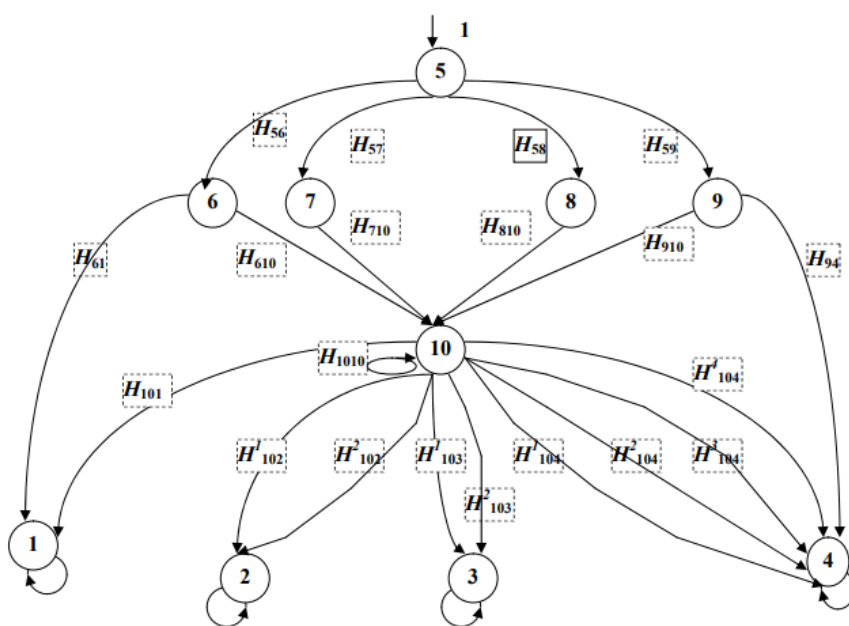


Рисунок 3.15 - Еквівалентний імовірнісний граф після видалення після заміни петель на одну петлю

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 [29]:

$$H_{10r}^* = H_{10r} \cdot \frac{1 - (H_{1010})^m}{1 - H_{1010}}, \quad (22)$$

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:

$$H_{10r}^* = H_{10r} \cdot \frac{1}{1 - H_{1010}} \quad (23)$$

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. 3.16. Н-функції графа визначаються за формулою (23):

$$\begin{aligned} H_{101}^* &= H_{101} \cdot \frac{1}{1 - H_{1010}} = H_{101} \cdot \frac{1}{1 - b} ; \\ H_{102}^* &= (H_{102}^1 + H_{102}^2) \cdot \frac{1}{1 - H_{1010}} = (H_{102}^1 + H_{102}^2) \cdot \frac{1}{1 - b} ; \\ H_{103}^* &= (H_{103}^1 + H_{103}^2) \cdot \frac{1}{1 - H_{1010}} = (H_{103}^1 + H_{103}^2) \cdot \frac{1}{1 - b} ; \\ H_{104}^* &= (H_{104}^1 + H_{104}^2 + H_{104}^3 + H_{104}^4) \cdot \frac{1}{1 - H_{1010}} \\ &= (H_{104}^1 + H_{104}^2 + H_{104}^3 + H_{104}^4) \cdot \frac{1}{1 - b} . \end{aligned}$$

Приберемо проміжні вершини 6, 7, 8, 9 і 10. Граф набуде вигляду, показаний на рис. 3.17. [29]

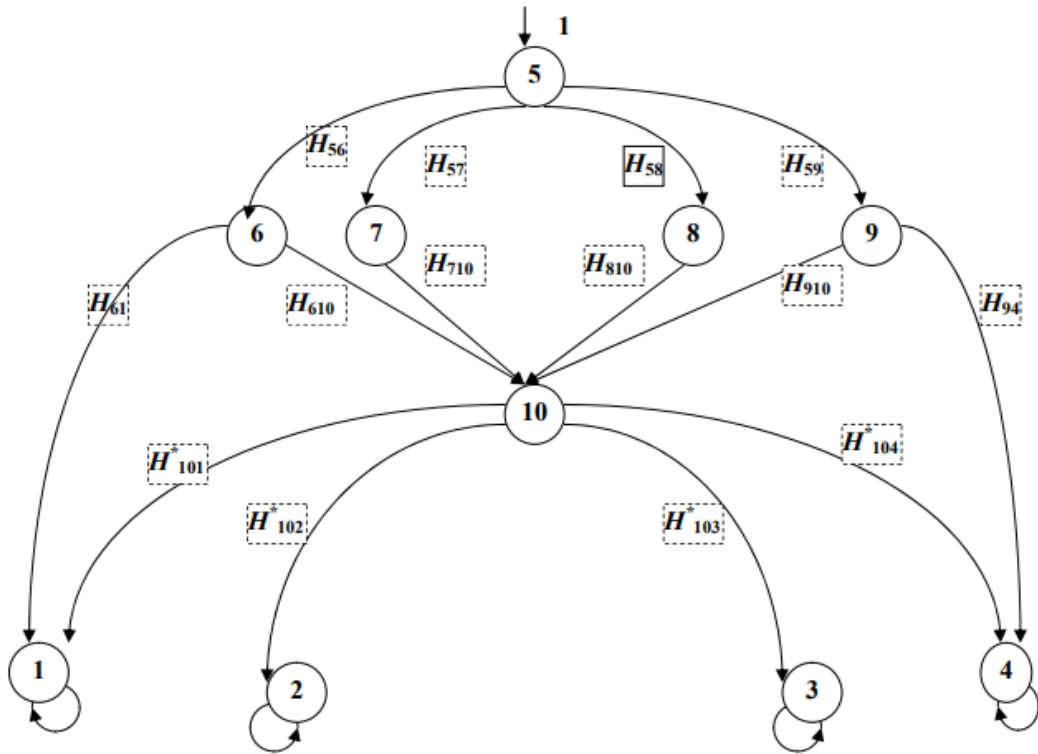


Рисунок 3.16 - Еквівалентний імовірнісний граф після видалення однорідної обмеженою петлі

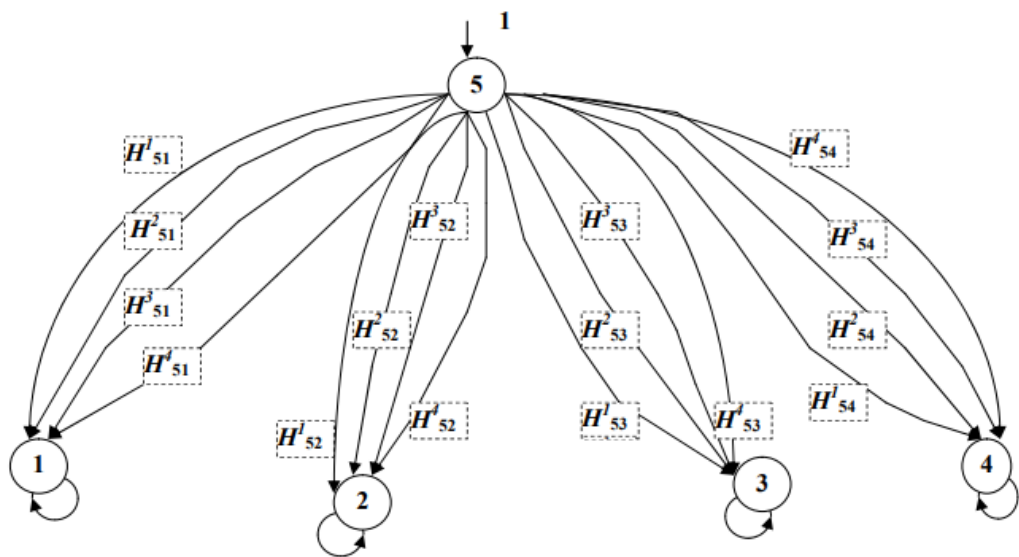


Рисунок 3.17 - Еквівалентний імовірнісний граф після видалення проміжних вершин 6, 7, 8, 9 і 10

Об'єднаймо паралельні дуги, отримаємо остаточний вигляд графа (рис. 3.18). [29]

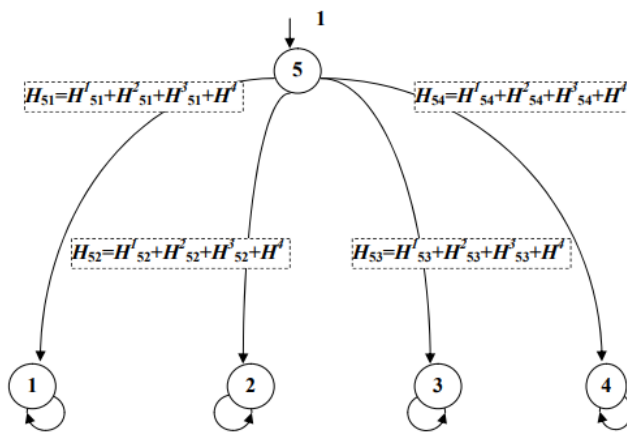


Рисунок 3.18 - Підсумковий імовірнісний граф

Н-функції графа приймають вид:

$$\begin{aligned}
 H_{51} &= H_{61} \cdot H_{56} + H_{101}^* \cdot (H_{56} \cdot H_{610} + H_{57} \cdot H_{710} + H_{58} \cdot H_{810} + H_{59} \cdot H_{910}); \\
 H_{52} &= H_{102}^* \cdot (H_{56} \cdot H_{610} + H_{57} \cdot H_{710} + H_{58} \cdot H_{810} + H_{59} \cdot H_{910}); \\
 H_{53} &= H_{103}^* \cdot (H_{56} \cdot H_{610} + H_{57} \cdot H_{710} + H_{58} \cdot H_{810} + H_{59} \cdot H_{910}); \\
 H_{54} &= H_{59} \cdot H_{94} + H_{104}^* \cdot (H_{56} \cdot H_{610} + H_{57} \cdot H_{710} + H_{58} \cdot H_{810} + H_{59} \cdot H_{910}).
 \end{aligned} \tag{24}$$

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

$$\begin{aligned}
 a &= H_{56} \cdot H_{610} + H_{57} \cdot H_{710} + H_{58} \cdot H_{810} + H_{59} \cdot H_{910} = B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^1 \cdot (K_{11}^{11} \cdot K_{22}^{10} + K_{22}^{10} \cdot K_{11}^{10} + \\
 &+ K_{11}^{11} \cdot K_{10}^{10}) + B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^0 \cdot (K_{11}^{11} \cdot K_{22}^{00} + K_{22}^{00} \cdot K_{11}^{10} + K_{11}^{11} \cdot K_{10}^{10}) + B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^0 \cdot (K_{11}^{00} \cdot K_{22}^{00} + \\
 &+ K_{22}^{00} \cdot K_{11}^{01} + K_{22}^{01} \cdot K_{11}^{00}) = \\
 &= \sum_{\substack{l=0,1 \\ k=0,1}} (B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^k \cdot \sum_{\substack{i=0,1 \\ j=0,1}} K_1^{li} \cdot K_2^{kj})
 \end{aligned} \tag{25}$$

де  $(i=1) \cap (j=1) = \emptyset$ .

$$H_{101}^* = H_{101} \cdot \frac{1}{1-b} = B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^1 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 \cdot K_1^{11} \cdot K_2^{11} \cdot \frac{1}{1-b};$$

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

$$H_{51} = B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^1 \cdot K_1^{11} \cdot K_2^{11} \left( 1 + B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 \cdot \frac{a}{1-b} \right), \quad (26)$$

де  $H_{51}$  - ймовірність безпомилкового виконання структури. Використовуючи формули (19), 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. [29]

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

$$H_{52} = (B_{p1}^1 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 + B_{p1}^1 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^0) \cdot K_1^{11} \cdot K_2^{01} \cdot \frac{a}{1-b}; \quad (27)$$

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

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

$$H_{53} = (B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^1 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 + B_{p2}^1 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^0) \cdot K_2^{11} \cdot K_1^{01} \cdot \frac{a}{1-b}; \quad (28)$$

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

$$H_{54} = (B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^0 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^1 + B_{p1}^0 \cdot B_{d1}^1 \cdot B_{d2}^0 + B_{p2}^0 \cdot B_{d1}^0 \cdot B_{d2}^1 + B_{p1}^0 \cdot B_{p2}^0 +$$

$$+ B_{d1}^0 \cdot B_{d2}^0) \cdot K_2^{01} \cdot K_1^{01} \cdot \frac{a}{1-b}; \quad (29)$$

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

Математичне сподівання часу виконання заданої ТФС визначається за формулою:

$$M(T) = M(T_p) + M(T_k) + [M(T_p) + M(T_d) + M(T_k)] \cdot \frac{a}{1-b}. \quad (30)$$

### 3.3. Вибір оптимального варіанту функціонування людино-машинної взаємодії

Алгоритм діяльності характеризується можливістю багатоваріантного виконання. Існують різні варіанти виконання робочих і контрольних операцій. Як правило, збільшення якості проведення контролю викликає збільшення часу. Оптимізація діяльності пов'язана, як правило, з мінімізацією збитків від ненадійності людини-оператора. Якщо враховувати той факт, що ціна помилок різного типу є різною, то задачу оптимізації в загальному вигляді можна сформулювати наступним чином:

$$u_1 B_1^0(x) + u_2 B_2^0(x) + u_3 B_{12}^0(x) \rightarrow \min$$

$$\text{при } T_{\text{заг}}(x) \leq T_0$$

де  $x$  – вектор, який для кожної операції алгоритму задає спосіб її виконання;

$u_1$  – збиток від помилки першого типу;

$u_2$  – збиток від помилки другого типу;

$u_3$  – збиток від помилки першого і другого типу;

$B_1^0$  – ймовірність виконання структури з помилкою першого типу;

$B_2^0$  – ймовірність виконання структури з помилкою другого типу;

$B_{12}^0$  – ймовірність виконання структури з помилкою першого і другого типу;

$T_{\text{заг}}$  – розрахований загальний час виконання структури;

$T_0$  – заданий час виконання структури.

Задачу в загальному випадку можна звести до задачі лінійного програмування. В даній роботі поставимо за мету обрати способи виконання контрольних операцій таким чином, щоб забезпечити мінімум збитку при обмеженні на математичне очікування часу виконання. Конкретний приклад технології вибору раціонального варіанту буде розглянуто в пункті комп'ютерне моделювання.





Таблиця 4.2 - Показники якості виконання контрольних ТФО

Показник		Операція		
		K1	K2	K3
Ймовірність	$K_1^{11}$	0,8056	0,8389	0,8656
	$K_1^{00}$	0,8689	0,8461	0,8913
	$K_2^{11}$	0,9001	0,9278	0,9294
	$K_2^{00}$	0,8689	0,8461	0,8913
Часовий	M, с	3,5	3,7	3,9

Для визначення показників якості ФС, зображеної на рисунку 4.1, необхідно виконати поетапне згортання, замінивши ТФС на еквівалентні їм ТФО. Цю дію потрібно повторювати до тих пір, поки вся задана структура АФ не буде згорнута в одну ТФО (рис. 4.2).

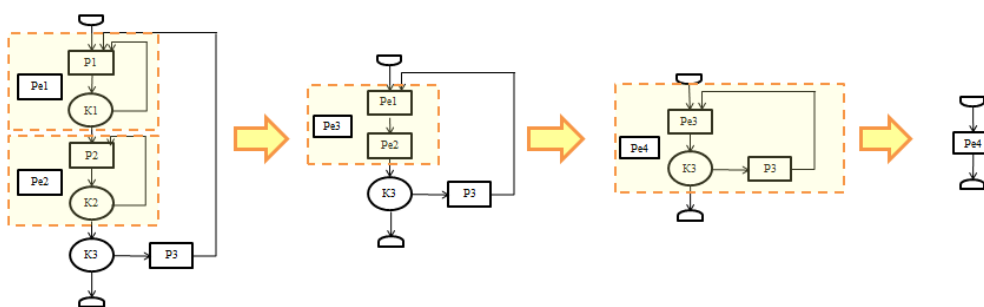


Рисунок 4.2 - Схема поетапного згортання структури

На рисунках 4.3-4.5 показані розраховані характеристики на кожному етапі згортання структури.

	Імовірність виконання робочої операції без помилок		Імовірність того, що фактично правильне виконання буде визнано правильним		Імовірність того, що фактично неправильне виконання буде визнано неправильним		Мат. очікування часу виконання робочої операції $M(Tp)$	Мат. очікування часу виконання операції контролю $M(Tk)$
	1-го типу	2-го типу	по 1-му типу помилок	по 2-му типу помилок	по 1-му типу помилок	по 2-му типу помилок		
	$B_1^{-1}$	$B_2^{-1}$	$K_1^{11}$	$K_2^{11}$	$K_1^{00}$	$K_2^{00}$		
1	0,92535	0,91525	0,8056	0,9001	0,8689	0,8689	2,50	3,5
2	0,91255	0,90781	0,8389	0,9278	0,8461	0,8461	3,10	3,7

	Імовірність безпомилкового виконання	Імовірність виконання ТФС з помилкою		Математичне очікування часу виконання	Імовірність помилкового виконання	Мат. очікування часу виконання операції контролю	
		1-го типу $B1(0)$	2-го типу $B2(0)$			$B1(1)$	$B2(1)$
Pe1	0,973906885	0,0127857	0,013134978	9,52	0,02609312	0,9872143	0,98687
Pe2	0,966443403	0,01699057	0,016279817	10,19	0,03355660	0,9830094	0,98372

Рисунок 4.3 – Перший етап згортання

	Імовірність безпомилкового виконання	Імовірність виконання ТФС з помилкою		Математичне очікування часу виконання	Імовірність помилкового виконання	B1(1)	B2(1)
		1-го типу	2-го типу				
Pe1	0,973906885	0,0127857	0,013134978	9,52	0,02609312	0,9872143	0,98687
Pe2	0,966443403	0,01699057	0,016279817	10,19	0,03355660	0,9830094	0,98372

```

graph TD
    Pe1[Pe1] --> Pe2[Pe2]
  
```

	Імовірність безпомилкового виконання	Імовірність виконання ТФС з помилкою		Математичне очікування часу виконання	Імовірність помилкового виконання
		1-го типу	2-го типу		
Pe3	0,942103158	0,02848499	0,028130294	19,71	0,05789684

Рисунок 4.4 – Другий етап згортання

```

graph TD
    Start(( )) --> Pe3[Pe3]
    Pe3 --> K3((K3))
    K3 --> P3[P3]
    P3 --> Pe3
    K3 --> End(( ))
  
```

Імовірність виконання робочої операції без помилки		Імовірність того, що фактично правильне виконання буде визнано правильним		Імовірність того, що фактично неправильне виконання буде визнано неправильним		очікування часу виконання робочої операції	очікування часу виконання операції контролю
1-го типу	2-го типу	по 1-му типу помилки	по 2-му типу помилки	по 1-му типу помилки	по 2-му типу помилки		
$B_{p1}^1$	$B_{p2}^1$	$K_1^{11}$	$K_2^{11}$	$K_1^{00}$	$K_2^{00}$	$M(Tr)$	$M(Tk)$
0,971515011	0,97186971	0,8656	0,9294	0,8913	0,8913	19,71	3,9
$B_{d1}^1$	$B_{d2}^1$					$M(Td)$	
0,93457	0,88093					3,15	

Розраховані ймовірності

Імовірність безпомилкового виконання	Імовірність виконання ТФС з помилкою			Математичне очікування часу виконання	Імовірність помилкового виконання
	1-го типу	2-го типу	1-го типу і 2-го типу		
0,983060212	0,00472717	0,004391525	0,0000593	33,16906501	0,016939788

Рисунок 4.5 – Третій етап згортання

Розглянемо оптимізаційну задачу вибору оптимального варіанту, якщо є декілька варіантів виконання контрольних операцій (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 - Варіанти виконання контрольних операцій

Показник		Операція	Час	Операція	Час	Операція	Час
		K1	М, с	K2	М, с	K3	М, с
Ймовірність ( $K_1^{00} = K_2^{00}$ )	1 варіант	0,8689	3,5	0,8461	3,7	0,8913	3,9
	2 варіант	0,8312	3,15	0,9533	4,3	0,9615	5
	3 варіант	0,7891	3	0,6441	3	0,7511	3,1

Розраховані характеристики та вибір оптимального варіанту показаний на рисунку 4.6.

Комбінації варіантів	Ймовірність безпомилкового виконання	Ймовірність виконання ТФС з помилкою			Математичне очікування часу виконання	Ймовірність помилкового виконання	M<33	Збиток від			Збиток	Мін
		1-го типу	2-го типу	1-го типу і 2-го типу				1-го типу	2-го типу	1-го типу і 2-го типу		
		3	5	10								
111	0,983060212	0,00472717	0,0043915	0,00005929	33,17	0,016939788						
112	0,990392806	0,00172924	0,0016065	0,00000768	34,99	0,009607194					0,03798	
113	0,968734261	0,01013033	0,009411	0,00029096	31,49	0,031265739	31,49				0,08036	
121	0,99328441	0,00423714	0,0039502	0,00004549	34,25	0,00671559						
122	0,999246874	0,00154197	0,0014375	0,00000586	36,00	0,000753126						
123	0,981504577	0,00917541	0,008554	0,00022558	32,68	0,018495423	32,68				0,07255	
131	0,966100278	0,00563111	0,0052032	0,00009015	32,02	0,033899722	32,02				0,04381	
132	0,975828466	0,00207718	0,0019193	0,00001178	33,98	0,024171534						
133	0,947373279	0,01186461	0,0109629	0,00043495	30,15	0,052626721	30,15				0,09476	
211	0,980095241	0,00488211	0,0045388	0,00006415	32,48	0,019904759	32,48				0,03798	
212	0,986752287	0,00224259	0,0020849	0,00001315	34,27	0,013247713						
213	0,964958678	0,01042895	0,0096956	0,00031377	30,77	0,035041322	30,77				0,0829	
221	0,990108068	0,00439019	0,0040957	0,00004962	33,58	0,009891932						
222	0,996520976	0,00160043	0,0014931	0,00000641	35,35	0,003479024						
223	0,977488443	0,00947386	0,0088385	0,00024517	31,98	0,022511557	31,98				0,07507	
231	0,963483466	0,00578779	0,005352	0,00009627	31,30	0,036516534	31,30				0,04509	
232	0,973628335	0,00213788	0,0019769	0,00001259	33,27	0,026371665						
233	0,943996972	0,01216096	0,0112453	0,00046317	29,41	0,056003028	29,41				0,09734	
311	0,976884585	0,00505426	0,0047025	0,00006979	32,22	0,023115415	32,22				0,03937	
312	0,985136674	0,00185496	0,0017259	0,00000907	34,09	0,014863326						
313	0,960860672	0,01075955	0,0100108	0,00034019	30,48	0,039139328	30,48				0,08573	
321	0,986668809	0,00456051	0,0042578	0,00005446	33,34	0,013331191						
322	0,993576222	0,00166561	0,0015551	0,00000704	35,13	0,006423778						
323	0,973129801	0,00980466	0,0091539	0,00026810	31,70	0,026870199	31,70				0,07786	
331	0,960649449	0,00596146	0,0055171	0,00010329	31,03	0,039350551	31,03				0,0465	
332	0,97125155	0,00220526	0,0020409	0,00001353	33,02	0,02874845						
333	0,940331753	0,01248842	0,0115575	0,00049546	29,10	0,059668247	29,10				0,10021	

Рисунок 4.6 – Вибір оптимального варіанту

Таким чином, для того щоб забезпечити мінімум збитку та час виконання не перевищував 33, необхідно обрати такі характеристики контрольних операцій:  $K1 = 0,8312$  з часом 3,15;  $K2 = 0,8461$  з часом 3,7;  $K3 = 0,8913$  з часом 3,9.

Для візуалізації обраного варіанту побудовані діаграми, зображені на рисунку 4.7.

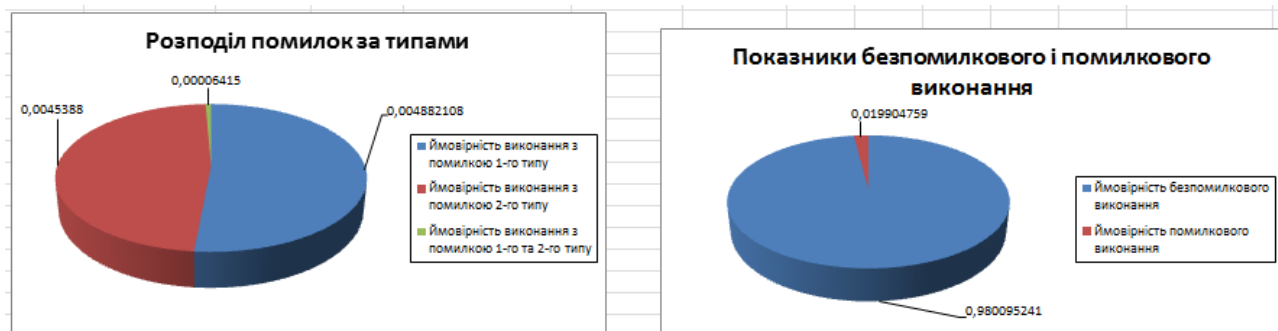


Рисунок 4.7 – Візуалізація результатів

На рисунку 4.8 представлений графік, що відображає залежність результатів збитку від якості контрольної операції.

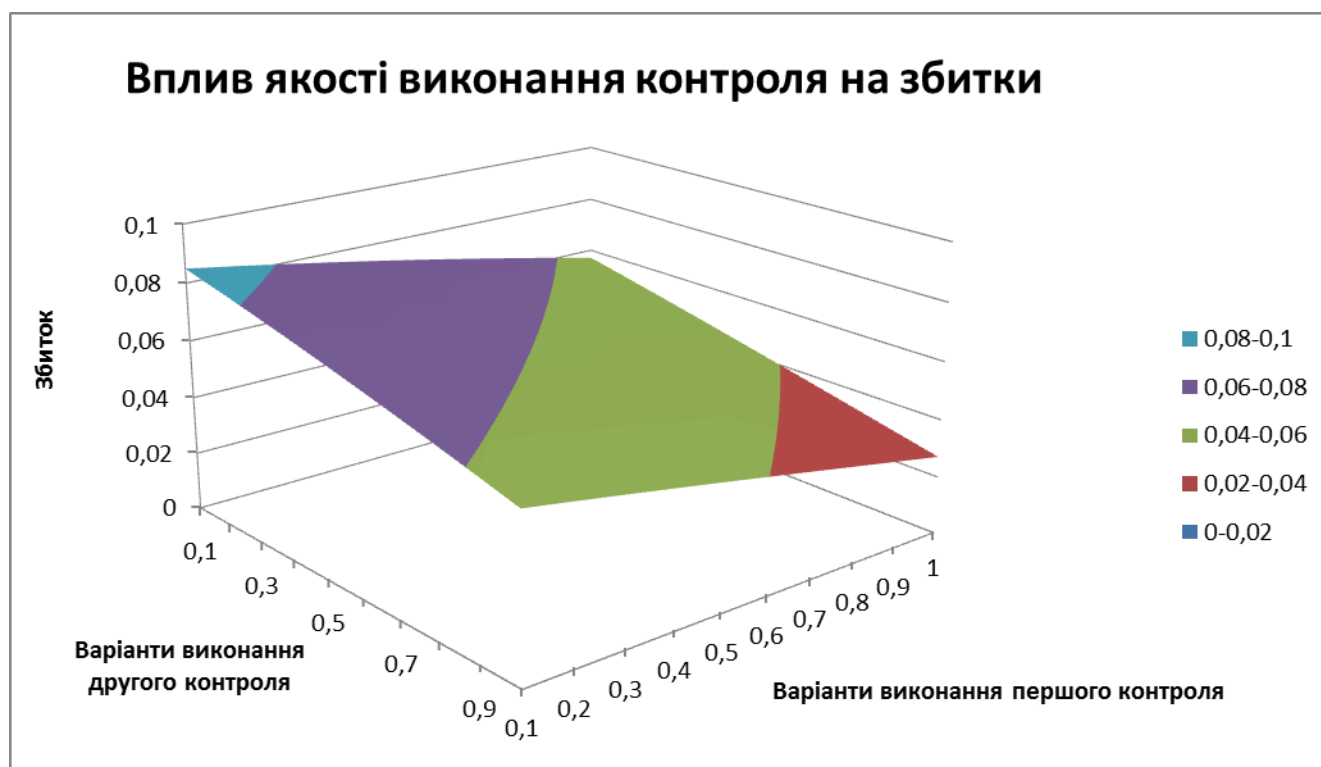


Рисунок 4.8 – Вплив якості виконання контролю на збитки

## ВИСНОВКИ

Тільки враховуючи помилки різних типів, можливо ефективно змоделювати надійність ЛМС. Це пов'язано з різними наслідками різних помилок. Для того, щоб автоматизувати отримання оцінок безпомилковості необхідно використати бібліотеку типових моделей. Для її отримання технологія методу укрупнення імовірнісного графа проф. Губинського А.І.

Розроблено математичні моделі і інформаційну технологію для моделювання надійності людино-машинної взаємодії в АСУ, де враховується можливість виникнення і усунення помилок декількох типів.

Розроблена оптимізаційна модель дозволяє обрати варіант виконання функціональної структури з мінімальною кількістю збитків та враховує обмеження в часі.

Розробка дозволяє визначити:

- ймовірність безпомилкового виконання;
- ймовірність виконання окремо з кожним типом помилки;
- математичне очікування часу виконання;
- оптимальний варіант виконання функціональної структури.

## 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) S. F. Sergeev, A.N. Anokhin, P. I. Paderno, A.A. Oboznov, "II International scientific-practical conference "Ergo 2016: Human factor in complex technical systems and environments," *Psikhologicheskii Zhurnal*, vol. 38, no.1, pp. 136–138, 2017.
  - 12) C. Osterman et al., "Conceptual and practical strategy work to promote ergonomics/human factors in Sweden," in Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018), IEA 2018. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 821. pp. 320–329. DOI: 10.1007/978-3-319-96080-7\_37
  - 13) Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. Л.: Наука, 1982. - 270с.
  - 14) Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. – М.: Энергоиздат, 1981. - 232 с.
  - 15) E. Lavrov, N. Pasko, A. Tolbatov, V. Tolbatov, "Cybersecurity of distributed information systems. The minimization of damage caused by errors of operators during group activity," in Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT-2017), Lviv, Ukraine, July 4–7, 2017, pp. 83–87.

- 16) E. Lavrov, N. Pasko, A. Kryvodub, A. Tolbatov, "Mathematical models for the distribution of functions between the operators of the computer-integrated flexible manufacturing systems," in Proceedings of the XIIIth International Scientific Conference TCSET'2016, Publishing House of Lviv Polytechnic, Lviv-Slavsko, Ukraine February 23–26, 2016, pp. 72–75.
- 17) C. F. Sergeev, P. I. Paderno, A. N. Anokhin, "International scientific conference "Psychology of labour, engineering psychology and ergonomics-2014," Psikhologicheskii zhurnal, vol. 36(2), pp. 128-131, 2015.
- 18) Суходольский Г.В. Инженерно психологический анализ и синтез профессиональной деятельности. – Автореф. дисс. На соиск. ученой степени докт. психол. наук. – Л.: 1982. – 40 с.
- 19) Клыков Ю.И. Ситуационное управление большими системами. М.: Энергия, 1974. – 136 с.
- 20) Попович П.Р., Губинский А.И., Колесников Г.М. Эргономическое обеспечение деятельности космонавтов. – М.: Машиностроение, 1985. – 272с.
- 21) Барченко Н.Л., Лавров Є.А Оцінка алгоритмів діяльності людини-оператора в модульних системах електронного навчання // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». Хмельницький, 2018. С. 119-123.
- 22) Лавров Е.А., Барченко Н.Л. Математические модели деятельности человека-оператора для управления качеством в дискретных производственных системах // Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції (Суми, 19-23 квітня 2010 року). Суми: СумДУ, 2010. С 76-77.
- 23) Лавров Е.А., Барченко Н.Л. Подход к выбору типа диалога для адаптивных обучающих систем «человек-компьютер» на основе анализа предпочтений оператора. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Харьков: Технологический центр, 2009. С. 45-48.



- 24) Лавров Е.А., Барченко Н.Л., Падерно П.И., Опарина Н.М. Эргономическое обеспечение критических систем. Организация контроля функционального состояния человека-оператора // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції: «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні» (Київ, 13-14 червня 2019 року). К: ТОВ «Аграр Медіа Груп», 2013. С.124-128.
- 25) Лавров Е.А., Барченко Н.Л. Модели для эргономической оценки деятельности операторов сложных систем // Тези доповідей одинадцятої наукової конференції Харківського університету повітряних сил ім. Кожедуба: «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (м. Харків, 8-9 квітня 2015 року). Харків: ХУПС ім. Кожедуба, 2015. С.215.
- 26) Лавров Є.А., Барченко Н.Л. Задача оцінювання і вибору варіантів людинно-машинної взаємодії // Сборник тезисов по материалам 21-й международной научной конференции «Технологии XXI века» (г. Сумы, Глухов, 8-10 сентября 2015 года). Сумы: СНАУ, 2015. С.128-129.
- 27) Лавров Е.А., Барченко Н.Л. Метод адаптивного управления человеко-машинным взаимодействием в автоматизированных системах // Автоматика-2016: матеріали ХХІІІ міжнародної конференції з автоматичного управління (м. Суми, 22-23 вересня 2016 року). Суми: СумДУ, 2016. С.142-143.
- 28) 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.
- 29) Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт зі спеціальності «Комп'ютерні науки» (Харків, 24-26 квітня 2019 року) Веб-сайт. URL: [http://nure.ua/wp-content/uploads/Main\\_Docs\\_NURE/skr\\_liliia.pdf](http://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/skr_liliia.pdf)
- 30) Надежность и эффективность комплексных систем «человек—техника». Ч.3. Под ред. А. И. Губинского. Л., ЛДНТП, 1970. – 15с.

- 31) 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.
- 32) Ротштейн А.П., Кузнецов П.Д. Проектирование бездефектных человеко-машинных технологий. К.: Техника, 1992. - 180с.
- 33) Технологии анализа данных. Веб-сайт. URL: <http://www.basegroup.ru/solutions/retailprofiler.htm>.

**Додаток А. Технічне завдання**

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**  
**на розробку математичних моделей і інформаційної технології**  
**«Моделі оцінки і оптимізації діяльності операторів систем обробки**  
**інформації і управління»**

**Суми 2019**

## **Формування вимог до моделей оцінки і оптимізації діяльності операторів систем обробки інформації і управління**

**1 Найменування:** математичні моделі оцінки і оптимізації діяльності операторів систем обробки інформації і управління.

**2 Терміни виконання:** 10 червня 2019 року.

**3 Призначення:** розроблені моделі і інформаційна технологія для моделювання надійності людино-машинної взаємодії в АСУ з урахуванням можливості виникнення і усунення помилок різних типів, що базується на вхідній інформації про типову структуру та ймовірнісні параметри кожної одиниці, повинні вплинути на підвищення рівня безпомилкового виконання роботи оператора та оптимізувати його діяльність.

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

**5 Основні завдання:** розрахунок ймовірності безпомилкового виконання, ймовірності виконання окремо з кожним типом помилки, математичного очікування часу виконання, вибір оптимального варіанту виконання довільної функціональної структури, візуалізація результатів обчислень у вигляді діаграм та графіків.

**6 Вхідні дані:** функціональна структура, надійнісні і часові характеристики типових функціональних одиниць, максимальний час виконання структури, кількість збитку від кожного типу помилки.

**7 Вихідні дані:** ймовірності виникнення помилок, ймовірність безпомилкового виконання, математичне очікування часу виконання, оптимальний варіант виконання структури, діаграми та графіки ймовірнісних характеристик.

**8 Програмне забезпечення:** моделювання, розрахунок і побудова діаграм повинні проводитися у програмі Microsoft Excel, версія 14.0.7229.5000 (32-розрядна).

**9 Апаратне забезпечення:** склад апаратного забезпечення повинен забезпечувати роботу програмного забезпечення, зазначеного у п. 8.

**10 Рівень кваліфікації:** користувач повинен мати навички роботи з ПК, а також у сімействі програм MS Office.

## Додаток Б

### Планування робіт

#### Деталізація мети методом SMART

Мета проекту: Створити моделі діяльності людини-оператора, що будуються за вибором алгоритму та параметру при формування оптимального рішення, які будуть оцінені експертами підприємства для виявлення, усунення помилок різного типу і використання запропонованих моделей для впровадження у виробничий процес, що дозволить оптимізувати роботу оператора і підвищити рівень обслуговування клієнтів. Проект буде виконано вчасно, що підтверджується календарним планом проекту.

**Планування змісту структури робіт.** Структурна декомпозиція робіт (work breakdown structure, WBS) - це графічне подання згрупованих елементів проекту у вигляді пакетів робіт, які ієрархічно пов'язані з продуктом проекту. Така структура необхідна для забезпечення ефективного управління проектом, визначення і структурування переліку робіт, створення структури звітності та розуміння задач виконавця. На рисунку Б.1 представлена структурна декомпозиція робіт проекту.

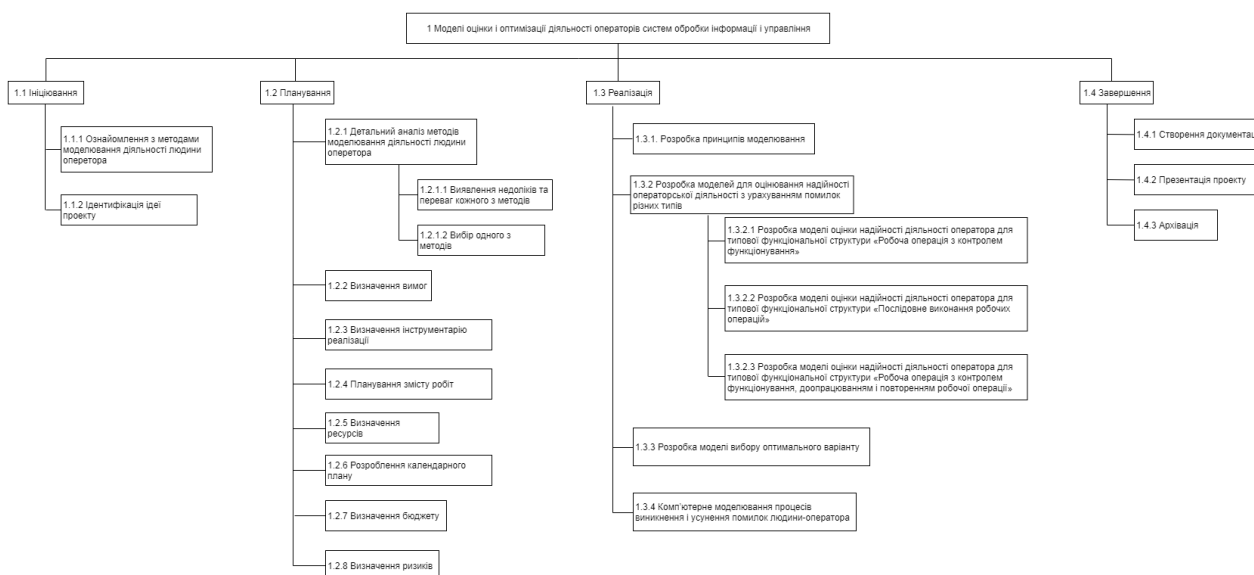


Рисунок Б.1 – WBS структура проекту

**Планування структури організації, для впровадження готового проекту (OBS).** Наступним кроком розробки структури проекту є визначення організаційної структури (OBS) проекту. Організаційна структура проекту (OBS) – є графічним відображенням учасників проекту (фізичних та юридичних осіб) та їхніх відповідальних осіб, залучених до реалізації проекту. На верхньому рівні OBS проекту знаходиться керівник та команда управління проектом; на наступному рівні – виконавці. Останнім рівнем OBS-структури є відповідальні особи виконавців. Це не обов’язково повинні бути керівники, а ті співробітники, яким доручено безпосередньо організувати і відповідати перед виконавцем за виконання конкретного елемента WBS-структури.

OBS структура представлена на рисунку Б.2.

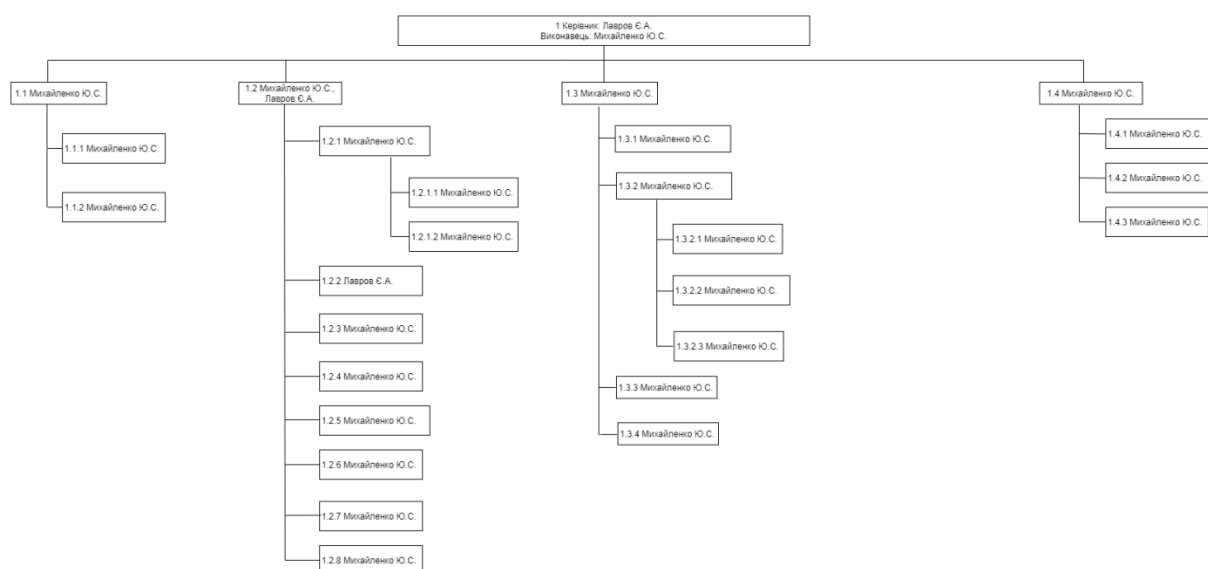


Рисунок Б.2 – OBS структура

**Побудова матриці відповідальності.** Матриця відповідальності (Responsibility Assignment Matrix) забезпечує опис і узгодження структури відповідальності за виконання пакетів робіт. Вона являє собою форму опису розподілу відповідальності за реалізацію робіт проекту із зазначенням ролі кожного з виконавців.

На рисунку Б.3 показано матрицю відповідальності проекту.

	CP1.1		CP1.2									CP1.3				CP1.4				
	CP1.1.1	CP1.1.2	CP1.2.1		CP1.2.2	CP1.2.3	CP1.2.4	CP1.2.5	CP1.2.6	CP1.2.7	CP1.2.8	CP1.3.1	CP1.3.2			CP1.3.3	CP1.3.4	CP1.4.1	CP1.4.2	CP1.4.3
			CP1.2.1.1	CP1.2.1.2									CP1.3.2.1	CP1.3.2.2	CP1.3.2.3					
Мизайленко Ю.С.	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Лавров Є.А.					+															

Рисунок Б.3 – Матриця відповідальності

**Діаграма Ганта.** Діаграма Ганта - це популярний вид діаграми (придуманий Генрі Гант), який використовується для планування і контролю виконання проекту. Такий інтерактивний мережевий графік присутній практично у всіх системах управління проектами.

На діаграмі відображаються завдання і стадії проекту з урахуванням їх часу виконання. Завдання на діаграмі можуть бути залежними один від одного (наприклад, одна задача може починатися тільки після завершення другого). Крім того, може показуватися відсоток виконання кожного завдання і відповідальний за її виконання.

Діаграма Ганта зручна для управління часом проекту. Якщо поставити плановану тривалість кожного завдання і залежності між завданнями - можна легко отримати теоретичний термін проекту (критичний шлях). А подивившись на діаграму під час виконання проекту, можна швидко оцінити, наскільки людина встигає зробити у заплановані терміни, і ввести відповідні коригування. Для побудови діаграми Ганта використовуємо програму MS Office Project 2010 року.

Визначившись з завданнями, які повинні бути виконані, і точним часом їх виконання, отримуємо діаграму Ганта, яка показана на рисунку Б.4.



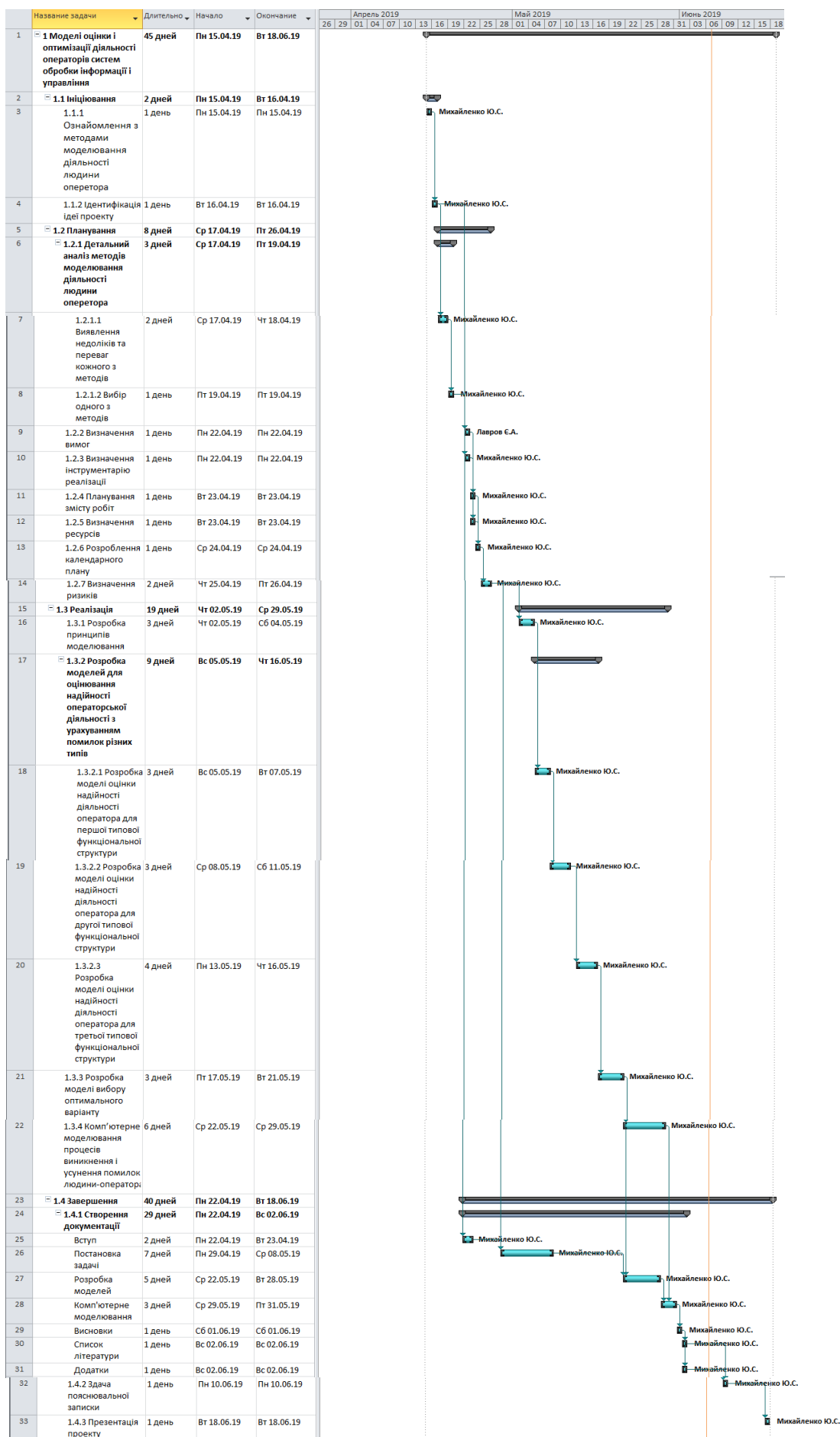


Рисунок Б.4 – Діаграма Ганта

**Аналіз ризиків.** Виконаємо якісну і кількісну оцінку ризиків роботи. При якісній оцінці визначимо ризики, що потребують швидкого реагування. Така оцінка визначить ступінь важливості ризику і дозволить вибрати спосіб реагування. Кількісна оцінка ризиків буде виконана для більш повної ідентифікації ризиків та ступеня їхнього впливу на виконання проекту. Кількісна і якісна оцінка ризиків можуть використовуватися окремо або разом, залежно від наявного часу і бюджету, необхідності в кількісній або якісній оцінці ризиків.

Визначимо ризики:

- R1 – зміна вимог при реалізації проекту;
- R2 – невчасне виконання етапів проекту;
- R3 – виявлення помилок на етапі завершення;
- R4 – виникнення несправностей в апаратному забезпеченні;
- R5 – непередбачувані життєві обставини розробника.

У таблиці Б.1 показана ймовірність виникнення кожного з зазначених ризиків.

Таблиці Б.1 - Ймовірність виникнення ризиків

Ймовірність виникнення	R1	R2	R3	R4	R5
Дуже низька					
Низька			+		
Середня		+		+	+
Висока	+				
Дуже висока					

У таблиці Б.2 показані витрати при виникненні кожного з зазначених ризиків.

Таблиця Б.2 – Втрати при виникненні ризиків

Значимість впливу	R1	R2	R3	R4	R5
мінімальна					
низька					+
середня		+			
висока				+	
максимальна	+		+		

Виходячи з цих двох, була побудована Матриця впливу (ймовірностей і наслідків) ризиків. В матриці світлим кольором позначено неважливі ризики-білий колір, темнішим – помірні, темним – критичні.

Таблиця Б.3 – Матриця ймовірність-втрати

Ймовірність			
			R1
	R5	R2	R4
			R3
	Втрати		

Виходячи з цього, було визначено два критичні ризика, такі як:

- R1 – зміна вимог при реалізації проекту;
- R4 – виникнення несправностей в апаратному забезпеченні.

Перший ризик можна уникнути, заздалегідь визначивши вимоги з керівником. Другий ризик «виникнення несправностей в апаратному забезпеченні», може привести до некоректної роботи системи.

## Додаток В

### Порівняльний аналіз методів опису і оцінки процесів функціонування людино-машинних систем

Таблиця В.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. Ашеров 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 В.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 В.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 "Г"	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 "Г"	Ні	Так	Так	Так	Так	Так

Продовження таблиці В.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 (доопрацювань)	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 В.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 В.1

Метод Характеристика	Граф-схеми алгоритмів (ГСА)	Мережі PERT	Мережі GERT	Імітаційні моделі організаційно-технологічної надійності (ОТН)	Функціональні мережі	
					Граф-схеми	Функціональні мережі алгебраїзма
<b>8. Характеристика часу виконання роботи</b>						
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
<b>9. Загальна характеристика оцінки можливостей методу</b>						
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)

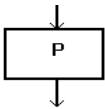
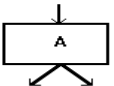
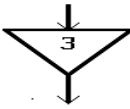
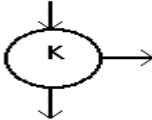
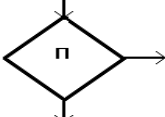
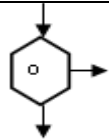
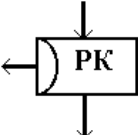
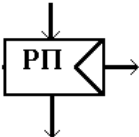
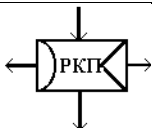
Продовження таблиці В.1

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 помилки, структурних відмов і оргвідмов

## Додаток Г

### Типові функціональні одиниці

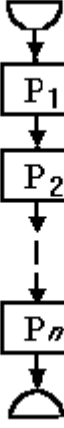
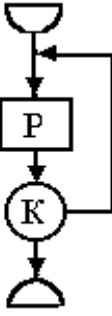
Таблиця Г.1 – Типові функціональні одиниці

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 Д

## Типові функціональні структури для опису діяльності оператора

Таблиця Д.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 Д.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>RKRI</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 style="text-align: center;">де</p> $B^1 = B_1^1 * B_2^1; \quad B^0 = 1 - B^1$

## Продовження таблиці Д.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 <math>X = \{T, W, C\}</math></p>

Додаток Е  
Копії публікацій

**TECHNICAL UNIVERSITY OF GABROVO**



**INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC CONFERENCE**

**UNITECH 2017  
GABROVO**

**P R O G R A M**

**17 - 18 NOVEMBER 2017  
GABROVO**

## A BASIC MODEL OF OPTIMIZATION OF THE MAN - MACHINE INTERACTION AND THE ANALYSIS OF THE PROSPECTS OF ITS USE IN ERGONOMICS OF AUTOMATED SYSTEMS

**N.B. Pasko**

*Sunny National Agrarian University(Ukraine)*

**E.A. Lavrov, Y.S. Mikhaylenko, T.V. Shcherban**

*Sunny State University(Ukraine)*

### Abstract

*A mathematical model of optimization of the man-machine system by the description of the functional algorithm in a form of an event graph was worked out.*

**Keywords:** man-machine system, optimization, algorithm, function, event graph, ergonomics.

### INTRODUCTION

Last years are characterized by a rapid change in the nature of automated technology management [1-3]:

- distributed information systems became widely spread;
- the number of operators, working simultaneously in single information space, has increased;
- the requirements for the efficiency of making decision are increasing;
- hierarchical management stipulated an increase of the role and responsibility of management operators;
- the necessity to take into account working conditions at the operator's workplaces has increased;
- the multivariance of technologies for the implementation of functions, ways of performing of individual operations, assigning operators to applications (transactions) has increased;
- the cost of errors is increasing.

In spite of the enormous achievements in the field of automation, it is impossible to exclude a person from management of complicated systems [1-3].

Paradoxically, but the role of the man-operator not only diminished, but it has even increased. 80% of accidents in production systems of different types, more than 64% of accidents in the marine fleet and 80% in aviation are caused by man-operator errors[1-3].

In fact, the purpose of every research in the field of designing of man-machine systems (MMS) is to reduce the mistaken reactions of man-operator [1-5].

The achievements of many researchers of the human factor, aimed at ensuring accuracy, are most successfully integrated in the functional-structural theory(FST) of ergotechnical systems of the school of Professor A.I. Gubinsky[1].

These models are based on the structure of algorithms for the functioning (AF) of MMS and probabilistic characteristics of the operations of these algorithms.

Developed within the framework of the FST schools, the Professor Gubinsky A.I. models stand out from many others by:

- focus on quantitative assessment;
- possibility of reduction ("folding") of the AF model with simultaneous calculation of the pragmatic AF parameters;
- computer-oriented dependencies.



The objectives of this work are:

- the development of the approach to the solution of the optimization problem of the AF MMS
- the substantive analysis of the tasks facing the designers of automated systems for using the model to improve the efficiency of automated control of complex systems.

## EXPOSITION

### Development of requirements for the model.

The optimization model should:

- allow to choose the variants to implement the algorithms of performing activity of various types irrespective of a subject area and the maintenance of carried out actions and operations;
- be computer-oriented
- allow for the simple realization on common software without the long-term training of ergonomists;
- allow for the creating of a library of standard models for the optimization of the most common types of relationships between AF operations;
- be compatible with the procedures of calculating the initial data for optimization and the guides on the performance characteristics of common actions and operations by ACS operators when realized on a computer.

In view of the fact that the latest most modern environment for modeling MMS has been determined the Excel environment, in which it was developed an information system focused on the evaluation of the performance indicators of AF FS implementation (author - Pasko NB), spreadsheets are also chosen as the most convenient environment for solving the optimization problem.

### Development of the AF model initial for optimization problem statement.

The functioning of the system can be formulated in the form of a work graph and an event graph.

The work graph represents a logic model of an interaction of the AF operation recorded with the help of special symbols

(functionaries, i.e., operations: working procedures, control of functioning, control of efficiency, alternative, etc. [4]).

The event graph is a secondary one and based on the works graph.

"Events" reflect the consequences of performing of AF "works", for example

- "free-error performing of a work operation",
- "performing of a work operation with an error".

An example of the transition from the work graph to the event graph is shown on Picture 1, where the following designations are introduced:

$P_i$  - work operation with number  $i$

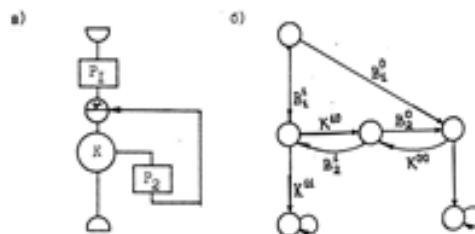
$K$  - performance control operation

$B_i^1(B_i^0)$  - probability of error-free (erroneous) performance of the operation with the number  $i$ ;

$K^{11}$  - the probability of recognizing that the error-free performance of a work operation is error-free;

$K^{00}$  - the probability of recognizing that the erroneous performance of a work operation is erroneous;

$$K^{01} = 1 - K^{00}; K^{10} = 1 - K^{11}.$$



Picture 1 - the example of a transition from work graph to the event graph

a) work graph; b) event graph.

### Optimization model on the "events" graph.

The use of the work graph for the ergonomist-designer is more convenient and visual, but it is possible to put the optimization problem on it only for particular cases (as a rule, for AF of a sequential type).

In this connection we will develop an optimization model on the "events" graph, which is a semi-Markov process (SMP).

The problem can be reduced to the problem of ensuring the maximum probability of absorption into a given state  $s$ , which, for example, corresponds to the event "error-free execution of AF".

On the event graph, we will assign our absorption state to each variant of the end of the operation accordingly, for example, "error-free execution of AF" or "execution of an AF with an error".

The vertices, which correspond to the absorption states, are numbered by the first  $r$  natural numbers ( $r$  is the number of absorbing vertices of the SMP).

For initial vertices, which are numbered by numbers from the numerical sequence after the first  $r$  absorbing vertices, it is necessary to specify a vector of initial probabilities, that is, the probability of finding the system in the initial states at the corresponding vertex of the event graph:

$$a = (a_{r+1}, a_{r+2}, \dots, a_m), \sum_{i=r+1}^m a_i = 1$$

Let us introduce the following variables and designations:  $P_{ij}^k$  - the probability of the transition of the SMP from the vertex  $i$  to the vertex  $j$  in the  $k$ -th method of performing the work,

$N$  - the total number of vertices, of which the first  $r$  - the absorption vertices,

$\bar{t}_i^k$  - the mathematical expectation of the random variable of process length of stay at the vertex  $i$  when choosing the  $k$ -th solution,

$\bar{u}_i^k$  - the mathematical expectation of resource consumption when the process is at the vertex  $i$  and the  $k$ -th solution is chosen;

$T_0$  - the limitation on AF execution time,

$U_0$  - the restriction on resource consumption for the implementation of AF,

$x_i^k$  - the variable that characterizes the choice of the solution:  $x_i^k > 0$  if for  $i$ -th vertex is chosen  $k$  solution, otherwise  $i$  is equal 0,

$K_i$  - the set of admissible solutions in the  $i$ -th vertex.

In such conditions, the problem is formulated as follows:

$$\sum_{i=r+1}^N \sum_{k \in K_i} P_{ij}^k x_i^k \rightarrow \max \quad (1)$$

$$\sum_{i=r+1}^N \sum_{k \in K_i} x_i^k \bar{t}_i^k \leq T_0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=r+1}^N \sum_{k \in K_i} x_i^k \bar{u}_i^k \leq U_0 \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K_j} x_j^k - \sum_{i=r+1}^N \sum_{k \in K_i} x_i^k P_{ij}^k = a_j, j = \overline{r+1, N} \quad (4)$$

$$x_j^k \geq 0, j = \overline{r+1, N}, k \in K_j \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K_j} \delta_j^k = 1 \quad (6)$$

$$x_j^k - M \delta_j^k \leq 0, j = \overline{r+1, N}, k \in K_j \quad (7)$$

$$\delta_j^k = \delta_j^l = \dots = \delta_j^m, k \in K_j \quad (8)$$

where  $l, m, \dots, n$  - dependent states which correspond to one AF operation (there may be several vertices on the event graph of one operation and it is obvious that identical decisions must be taken for them) or to the different operations that must be performed in the same way;  $\delta_j^k$  - a boolean variable (it takes the value 0 or 1);  $M$  - a sufficiently large number.

The conditions (6) and (7) are required to find the unique solution at the vertex where the only one way of performing the operation is admissible. As in the ACS in each particular operation mode, each operation can be performed only in the one way, and change of the way is possible only when another mode has been chosen and for each mode it is necessary to build the appropriate AF, we will use only a pure strategy. So, the restriction of type (6) and (7) shall be introduced for all vertices. The restriction (8) is required for choosing the same solutions in dependent states.

The convenience of the model (1) - (7) is that the problem is reduced to the problem of linear programming, which can be solved with the help of any software package focused on this problem.

**Approbation.** We carried out wide approbation of models of this type in different software environments, including:

- Excel
- Matlab.

The model has been used many times in solving problems of ergonomic design:

- Call-centers [5]
- Systems which provide access to Internet resources [6]
- Flexible manufacturing systems [7]
- Outsourcing campaign management systems [8-9]
- Management of the main gas pipeline [10-11]
- Settlement centers [12]
- e-learning [13]
- Production processes of machine-building enterprises [14-15], chemical industry enterprises [16].
- And etc.

**Analysis of the problems of the ergonomic management of the optimization model.**

In the process of the development of the arrangements for ergonomic quality assurance programs of automated systems it is required to solve the following tasks [4]:

- Professional selection of operators
- Selection of the degree of automation
- Distribution of functions between operators
- Design of information models
- Design of working conditions at operator's workplaces
- Design of the activity algorithms.

So far the main problem of the designing and efficient operation of ACS is to take into consideration the whole complex of influencing factors, such as:

- design features of workplaces, interface features;
- the intensity of activities,
- operator's functional state,
- the state of the environment,
- temporal conditions of activity,
- qualification of an operator,
- emotional condition,
- motivation,
- settings (for speed, response time, etc.)

It is clear that a change in the value of any of these factors leads to a change in the value of effectiveness of the AF.

However, analyzing the experience of using mathematical models of the type (1) - (8) in ergonomics, it is possible to make the conclusion that such an experiment takes place only within the framework of the scientific school "Efficiency, quality and reliability of ergotechnical systems of professor Gubinsky A.I." [4-17]. Among such models there are the models for the design of activity algorithms [4,5,6,9,17], the distribution of functions between a human and automation [4], the distribution of functions among operators [4,7,11,12], etc

Obviously, the practice of ergonomic management rarely refers to models of the type (1) - (8) because of the "narrow interpretation" of the concept "the method of performing an operation" (from the set of  $K_i$  - admissible solutions at the  $i$ -th vertex – refer to tasks (1) - (8)). Traditionally in ergonomics such method is interpreted restrictively ( for example, " to press the button" or " to toggle" or "to give a voice command")

In practice, the change of any parameter in the MMS leads to a change of the characteristics of the ways of operation performance. So, for example, if it is solved the problem of the design of working conditions at the operators' workstations is solved, then the reliability and time response characteristics of the operations performed at the corresponding work places are also changed accordingly.

Likewise there can be formed the variety of possible ways of the performing of operations taking into consideration the influence of all the above-mentioned influencing factors. And this is a combinatorial problem.

Evidently to overcome the obvious difficulties of applying optimization models in ergonomics it is required:

- to expand the interpretation of the concept of " the method of operation performance"
- to develop information technology to generate possible ways of performing operations based on a combination of possible MMS parameters

## CONCLUSION

It has been developed the mathematical model of the optimization of the human-machine system when describing the algorithm of functioning in the form of an event graph.

The optimization is reduced to the problem of linear programming.

The wide outreach of information technologies for solving linear programming problems makes this model quite a convenient tool for ergonomists and experts in the reliability of MMS.

The task of the subsequent widespread implementation of the optimization model in ergonomic management of automated systems is determined as the task of automatic generation of the alternatives for AF MMS, operations with the determination of the appropriate reliability and time response characteristics.

## REFERENCES:

- [1] Rothmorea, P., Aylwardb, P., Karmona J. The implementation of ergonomics advice and the stage of change approach [Text]. / P. Rothmorea, P. Aylwardb, J. Karmona // 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] Gubinskiy A.I., Evgrafov V.G. Information controlling human-machine systems: research, design, testing. Reference book, Moscow, Mechanical Engineering, 1993. 528 p. (In Russian)
- [5] Lavrov, E. Modelling Of Operator's Activity in Contact Center Of Providing Internet And Television Services [Text] / E. Lavrov, A. Krivodub, Y. Shapochka // International Scientific Conference "UNITECH '16". Proceedings. 18-19 November 2016, Gabrovo, Bulgaria. - Gabrovo: University Publishing House "V.APRILOV", 2016. – Volume 2. - P.p 195-200
- [6] Krivodub A.S. Evaluation of the reliability of operators' activity in systems providing access to computer network resources. Series: New solutions in modern technologies. News of National Technical University "KhPI", 2016, no. 18 (1190), pp. 140-147. (In Russian)
- [7] Lavrov, E. Mathematical models for the distribution of functions between the operators of the computer-integrated flexible manufacturing systems / N. Pasko, A. Krivodub, A. Tolbatov // proceedings of the XIII-th international conference tcset'2016 "modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science". – Lviv-Slavsko, Ukraine, february 23 – 26, 2016. – p. 72-76
- [8] Lavrov, E. Ergonomics of IT outsourcing. Development of a mathematical model to distribute functions among operators [Text] / E. Lavrov, N. Pasko, A. Krivodub, N. Barchenko, V. Kontsevich // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2016. – N4 (80). – P. 32-40
- [9] Lavrov E.A., Krivodub A.S. The approach to the evaluation of options for the operators of technical support for information services of telecommunication systems. Reports of BSUR, Minsk, 2015, no. 2 (88), pp. 123-126. (In Russian)
- [10] Koshara V.S., Lavrov E.A. The formalized description of the activity of operators of the gas-pumping plant control system // Computer science, mathematics, automatics: the materials and the program of the scientific and technical conference, Sumy, April 18-22, 2016. - Sumy, Sumy State University, 2016, 96 p. (In Russian)
- [11] Koshara V., Krivodub A., Pasko, N., Lavrov E. Information Technology Distribution of Applications between Operators of the Compressor Station // Advanced Information Systems and Technologies : proceedings of the IV international scientific conference, May 25-27, 2016 - Sumy: Sumy State University, 2016. - p. 89
- [12] Lavrov, E. Information technology for distribution of functions between operators in automated systems. Analysis of efficiency. [Text] / E. Lavrov, N. Pasko, // International Scientific Conference "UNITECH '15". Proceedings. 18-19 November 2015, Gabrovo, Bulgaria. - Gabrovo: University Publishing House "V.APRILOV", 2015. – Volume 2. - P.p 298-306
- [13] Lavrov E. Development of models for the formalized description of modular e-learning

- systems for the problems on providing ergonomic quality of human-computer interaction/ E Lavrov, N Barchenko, N Pasko, I Borozenc// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2 (2 (86)), 4-13
- [14] Bahmach M., Lavrov E. Program Complex of Statistical Calculations for Control the Quality of Products at Lebedinsky Plant of Piston Rings Advanced Information Systems and Technologies: proceedings of the IV international scientific conference, May 25-27, 2016- Sumy: Sumy State University, 2016. - P. 82-84
- [15] Bahmach N.V., Lavrov E.A. The formalized description of the production processes at the Lebedinsky Factory of Piston Rings for quality management tasks // Computer science, mathematics, automatics: the materials and the program of the scientific and technical conference, Sumy, April 18-22, 2016 - Sumy, Sumy State University, 2016, 90 p. (In Russian)
- [17] Lavrov E.A., Skidanenko A.S. Ergonomic reserves of increasing the efficiency of automated process control system for the production of fertilizers // Modern Information Systems and Technologies: the materials of the Second International Scientific and Practical Conference, Sumy, May 21-24, 2013 - Sumy: Sumy State University, 2013, pp. 53-54. (In Russian)



11. Koshun V., Krivodub A., Pasko, N., Lavrov E. Information Technology Distribution of Applications between Operators of the Compressor Station //Advanced Information Systems and Technologies: proceedings of the IV international scientific conference, May 25-27, 2016 - Sumy: Sumy State University, 2016. - P. 89.
12. Lavrov, E. Information technology for distribution of functions between operators in automated systems. Analysis of efficiency. [Text] / E. Lavrov, N. Pasko, // International Scientific Conference «UNITECH '15». Proceedings. 18-19 November 2015, Gabrovo, Bulgaria. - Gabrovo: University Publishing House «V.APRILOV», 2015. – Volume 2. - P p 298-306.
13. Lavrov E. Development of models for the formalized description of modular e-learning systems for the problems on providing ergonomic quality of human-computer interaction/ E Lavrov, N Barchenko, N Pasko, I Borozheno// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2 (2 (86)), 4–13.
14. Bahmach M., Lavrov E. Program Complex of Statistical Calculations for Control the Quality of Products at Lebedinsky Plant of Piston Rings. Advanced Information Systems and Technologies: proceedings of the IV international scientific conference, May 25-27, 2016– Sumy: Sumy State University, 2016. – P. 82-84.
15. Бахмач Н.В., Лавров Е.А. Формализованное описание производственных процессов на Лебединском заводе поршневых колец для задач управления качеством // Информатика, математика, автоматика: материалы та програма науково-технічної конференції, м. Суми, 18-22 травня 2016 р. – Суми : СумДУ, 2016. – С. 90.
16. Лавров Е.А., Сходженко А.С. Эргономические резервы повышения эффективности АСУТП производства удобрений //Сучасні інформаційні системи і технології: Матеріали Другої міжнародної науково-практичної конференції, м. Суми, 21-24 травня 2013 р. — Суми : СумДУ, 2013. — С. 53-54.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДАМИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕКО-МАШИНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Е. А. Лавров, Н. Б. Паско, Т. В. Щербань, Ю. С. Михайленко

Сумский государственный университет

Сумы

[prof\\_lavrov@sumdu.edu.ua](mailto:prof_lavrov@sumdu.edu.ua)

Приваленованы ергономічні проблеми сучасного цифрового управління. Предложено метод оптимізації алгоритма діяльності людини-оператора. Охарактеризована сфера можливого застосування методу. Предложено пути широкого внедрения методов оптимізації в практику ергономічного забезпечення.

**Ключевые слова:** цифровые технологии производства, эргономика, человек-оператор, деятельность, оптимизация, надежность.

## IMPROVEMENT OF DIGITAL TECHNOLOGIES OF PRODUCTION BY METHODS OF OPTIMUM CONTROL OF HUMAN-MACHINE INTERACTION

E. A. Lavrov, N. B. Pasko, T. V. Shcherban, Y. S. Michaylenko

Zakry State University

Zakry

Ergonomic problems of modern digital control are analyzed. A method for optimizing the algorithm of human operator activity is proposed. The sphere of possible applications of the method is characterized. Ways of wide introduction of optimization methods in the practice of ergonomic provision are suggested.

**Key words:** digital production technology, ergonomics, human operator, activity, optimization, reliability.

**Введение.** Последние годы охарактеризованы быстрым изменением характера автоматизированного управления технологиями [1-3]:

- получили широкое распространение цифровые распределенные системы информационные системы
- увеличилось количество операторов, одновременно работающих в едином информационном пространстве
- возрастает требования к оперативности принятия решений
- иерархическое управление обусловило повышение роли и ответственности операторов-руководителей
- увеличилась необходимость учета условий труда на рабочих местах операторов
- увеличилась многовариантность: технологий реализации функций, способов выполнения отдельных операций, закрепления операторов за заданиями (операциями)
- возрастает цена ошибок

Несмотря на колоссальные достижения в области автоматизации исключить человека из контура управления сложными системами не удается [1-3].

Парадоксально, но роль человека оператора не только не уменьшается, но даже увеличивается. 80% аварий в производственных системах разных типов, более 64% катастроф на морском флоте и 80% в авиации вызваны ошибками человека-оператора [1-3].

Фактически все исследования в области проектирования человеко-машинных систем (ЧМС) ставят целью уменьшить ошибочные реакции человека-оператора [1-5].

Достижения многих исследователей человеческого фактора, направленные на обеспечение безопасности, наиболее удачно комплексированы в функционально-структурной теории (ФСТ) эргономических систем школы проф. А.И. Губинского [4].

В основу этих моделей положены структуры алгоритмов функционирования (АФ) ЧМС и вероятностные характеристики операций этих алгоритмов.

Разработанные в рамках школы ФСТ проф. Губинского А. И. модели выгодно отличаются от многих других [4].



- ориентацией на количественную оценку
- возможностью редукции («сворачивания») модели АФ с одновременным расчетом прагматических показателей АФ
- компьютерноориентированными зависимостями

#### Постановка задачи.

Целью настоящей работы является:

- разработка подхода к решению оптимизационной задачи АФ ЧМС
- содержательный анализ задач, стоящих перед проектируемыми автоматизированными системами по использованию модели для повышения эффективности автоматизированного управления сложными системами.

#### Подход к решению оптимизационной задачи.

Разработка требований к модели. Оптимизационная модель должна:

- позволять выбрать варианты реализации алгоритмов исполнительской деятельности различных типов независимо от предметной области и содержания выполняемых действий и операций
- быть компьютерноориентированной
- допускать возможность простой реализации на распространенных программных средствах без длительного обучения экономистов
- допускать возможность создания библиотек типовых моделей для оптимизации наиболее распространенных видов взаимосвязей между операциями АФ
- допускать совместимость при реализации на компьютере с процедурами расчета исходных данных для оптимизации и справочниками по характеристикам качества выполнения типовых действий и операций операторами цифровых систем управления

В связи с тем, что последней наиболее современной средой моделирования ЧМС определена среда EXCEL, в которой разработана информационная система, ориентированная на оценку показателей эффективности реализаций АФ ЧМС (автор- Пасьяк Н.Б.), в качестве наиболее удобной среды решения оптимизационной задачи также выбраны электронные таблицы.

Таким образом, для решения задачи предложено:

- осуществить переход от графа работ, описывающего АФ ЧМС, к графу событий (полумарковской процесс)
- построить целевую функцию, соответствующую максимизации вероятности попадания в заданную вершину (безошибочное выполнение)
- сформулировать ограничения (как правило, на время и расход ресурсов)
- реализовать процедуру «Поиск решения»
- проанализировать решение и разработать соответствующие технические решения, реализующие рекомендуемые параметры ЧМС

Разработанные программное и методическое обеспечение максимально упрощает технологию получения оптимальных решений. При этом разработана база данных методов решения типовых задач для типовых АФ ЧМС.

Анализ проблем использования оптимизационных моделей и пути совершенствования эргономических решений. В процессе разработки мероприятий программ обеспечения эргономического качества автоматизированных систем необходимо решать задачи [4]:

- профессиональный отбор операторов
- Выбор степени автоматизации
- распределение функций между операторами
- проектирование информационных моделей
- проектирование условий труда на рабочих местах операторов
- проектирование алгоритмов деятельности

Таким образом, основной проблемой проектирования и эффективной эксплуатации автоматизированных систем, стоящая сегодня, - проблема учета всего комплекса взаимосвязанных факторов, таких как:

- конструктивные особенности рабочих мест, особенности интерфейса
- напряженность деятельности
- функциональное состояние оператора
- состояние среды
- темповые условия деятельности
- подготовленность оператора
- эмоциональное состояние
- мотивация
- установки (на скорость, на быстроедействие) и т.п.

Понятно, что изменение значения любого из указанных факторов приводит к изменению значений эффективности АФ.

Однако, если проанализировать опыт использования в эргономике математических моделей описанного типа, то можно прийти к выводу, что такой опыт имеет место только в рамках научной школы «Эффективность, качество и надежность эргономических систем проф. Губинского А. И.» [4]. Среди таких моделей – модели для проектирования алгоритмов деятельности [4,5,6], распределения функций между человеком и автоматикой [4], распределения функций между операторами [4,7,8] и др.

Очевидно, практика эргономического обеспечения редко обращается к оптимизационным моделям эргономики в связи с «узкой трактовкой» понятия «способ выполнения операции». Традиционно в эргономике такой способ трактовался узко (например, «нажать кнопку» или «переключить тумблер» или «дать голосовую команду»).

На практике изменение любого параметра в ЧМС приводит к изменению характеристик способов выполнения операций. Так, например, если решается задача проектирования условий труда на рабочих местах операторов, то соответственно изменяются и надежность-временные характеристики операций, выполняемых на соответствующих рабочих местах.

Аналогичным образом могут формироваться множества возможных способов выполнения операций посредством учета влияния всех перечисленных выше взаимосвязанных факторов. А это – комбинаторная задача.

Очевидно, чтобы преодолеть очевидные трудности применения оптимизационных моделей в эргономике, необходимо:

- расширить трактовку понятия «способ выполнения операции»
- разработать информационную технологию генерации возможных способов выполнения операций на основе комбинации возможных параметров СЧМ.

### Библиографический список

1. Rothmore, P., Aylward, P., Karmona J. The implementation of ergonomics advice and the stage of change approach [Text] / P. Rothmore, P. Aylward, J. Karmona // *Applied Ergonomics*. – 2015. – № 51. – P. 370-376.
2. Bentley, T.A., Teo, S.T.T., McLeod, L., Tana, F., Boma, 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. Boma, M. Gloet // *Applied Ergonomics*. – 2016. – № 52. – P. 207-215.
3. Wang, Y., Zheng, L., Hui, T., Zheng, Q. Stress, burnout and job satisfaction: case of police force in China [Text] / Y. Wang, L. Zheng, T. Hui // *Public Pers. Manag.* – 2014. – №43. – P. 325-339.
4. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытание: Справочник / Под общ. ред. А.И. Губинского и В.Г. Есграфова. – М.: Машиностроение, 1993. – 528с.
5. Lavrov, E. Modelling Of Operator's Activity In Contact Center Of Providing Internet And Television Services [Text] / E. Lavrov, A. Krivodub, Y. Shapochka // *International Scientific Conference «LNITECH '16». Proceedings. 18-19 November 2016, Gabrovo, Bulgaria.* - Gabrovo: University Publishing House «V.APRILOV», 2016. – Volume 2. - P p 195-200.
6. Криводуб А.С. Оценка надежности деятельности операторов в системах предоставления доступа к ресурсам компьютерных сетей // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – 2016. – № 18 (1190). – С.140-147.
7. Lavrov, E. Mathematical models for the distribution of functions between the operators of the computer-integrated flexible manufacturing systems / N. Pasiko, A. Krivodub, A. Tolbatov // *proceedings of the XIII-th international conference icset'2016 «modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer sciences»*. – Lviv-Slavsko, Ukraine, february 23 – 26, 2016. – p. 72-76.
8. Lavrov, E. Ergonomics of IT outsourcing. Development of a mathematical model to distribute functions among operators [Text] / E. Lavrov, N. Pasiko, A. Krivodub, N. Barchenko, V. Kostevich // *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. – N 4 (80). – P. 32-40.

Министерство образования и науки РФ ■ Петрозаводский государственный университет ■ Московский международный университет ■ ООО «ФОРС – Центр разработки» ■ ООО «Интернет-бизнес-системы» ■ Институт прикладных математических исследований КирНЦ РАН

## **ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ, НАУКЕ, ОБЩЕСТВЕ**

Материалы XII всероссийской  
научно-практической конференции

(4–6 декабря 2018 года)

Петрозаводск  
2018

### МОДЕЛИ ДЛЯ ЭРГОНОМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ, УПРАВЛЯЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СЛОЖНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Е. А. Лавров, Т. В. Щербань, Ю. С. Михайленко, А. В. Федорова

Сумской государственной университете

Сумы

prof\_lavrov@mail.ru

Рассмотрены проблемы создания систем информационной безопасности автоматизированных систем. Обоснована необходимость эргономического обеспечения деятельности операторов. Разработана структура системы эргономического обеспечения операторов, описаны основные задачи и подходы к их решению.

**Ключевые слова:** эргономика, кибербезопасность, информационная безопасность, управление инцидентами, надежность, человек-оператор, система управления.

### MODELS FOR ERGONOMIC MAINTENANCE OF OPERATORS MANAGING INFORMATION SECURITY OF COMPLEX AUTOMATED SYSTEMS

E. A. Lavrov, N. B. Pasko, T. V. Shcherban, Y. S. Mikhaylenko, A. V. Fedorova

Sumy state university

Sumy

The problems of creating information security systems of automated systems are considered. The necessity of ergonomic support for the activities of operators has been substantiated. The structure of the system of ergonomic support of operators was developed, the main tasks and approaches to their solution were described.

**Key words:** ergonomics, cybersecurity, information security, incident management, reliability, human operator, control system.

**Исходные предпосылки.** Создание системы управления информационной безопасностью (обозначаются аббревиатурой SIM (Security Information Management), SIEM (Security Information and Event Management), Cyber Security and Management (CSM)) предполагает создание системы поддержки принятия решений, направленных на минимизацию последствий различных нарушений, в т. ч. инцидентов безопасности. Имеется в виду, что инцидент — любое событие, которое не является частью стандартного функционирования, которое приводит или может привести к остановке или снижению качества функционирования или предоставления услуги [1].

**Проблема управление инцидентами и постановка задач исследования.** Главная цель процесса управления инцидентами — восстановить штатное функционирование и минимизировать отрицательное влияние инцидентов на бизнес-процессы [1]. Основные действия, выполняемые в процессе управления инцидентами (Рис. 1).

- обнаружение и регистрация инцидента;
- классификация и первичная поддержка;

- расследование и диагностика;
- разрешение и восстановление;
- закрытие инцидента.

Качество работ по управлению инцидентами существенно зависит от характеристик и организации деятельности операторов, задействованных в процессе реализации этих этапов:

- квалификация,
- мотивация,
- функциональное состояние,
- загруженность,
- операционно-темповая напряженность деятельности,
- условия труда на рабочем месте,
- качество информационной модели,
- степень автоматизации,
- наличие процедур поддержки принятия решений,
- распределение функций между операторами,
- др.



Рис. 1 Схема процесса управления инцидентами

Целью настоящей работы является разработка структуры системы эргономического обеспечения деятельности операторов управляющих информационной безопасностью сложных автоматизированных систем.

**Разработка номенклатуры задач эргономического обеспечения системы управления информационной безопасностью.** Основными задачами эргономики и информационной безопасности должны быть:

- определение численности операторов и их квалификации,
- определение степени автоматизации расследования и устранения инцидентов (распределение функций между операторами и средствами автоматизации),
- распределение функций между операторами и проектирование групповой деятельности по расследованию и устранению инцидентов,
- проектирование условий труда (в т. ч. по темпу и количеству обрабатываемых заявок),
- проектирование информационных моделей адаптивных интерфейсов для операторов,
- проектирование алгоритмов деятельности по расследованию и устранению инцидентов операторов.

**Принципы разработки информационных моделей для операторов.** При автоматизации процессов управления инцидентами необходимо уделять внимание автоматизированной обработке событий информационной безопасности — основе практически любого инцидента. События от различных технических средств защиты являются важнейшим поставщиком информации о процессах, происходящих в системе управления информационной безопасностью, нарушениях, рисках. На основании событий проводятся корректирующие действия, оценка текущей защищенности системы, эффективности функционирования системы информационной безопасности. Только обладая полным и достоверным набором событий, можно провести надлежащее расследование инцидентов. События — основной канал обратной связи для управляющих воздействий в рамках системы управления информационной безопасностью. Если соответствующая база данных отсутствует, информация об имеющих отношение к инциденту единицах конфигурации будет добываться вручную, что существенно увеличит время обработки инцидента и повысит ее сложность. Для поддержания процесса обработки событий на уровне, обеспечивающем информационное обеспечение операторов технической поддержки, необходима автоматизированная система управления обработкой событий (АСУОС).

АСУОС должна:

- собирать события от всех информационно-технических средств и возможных источников инцидентов;
- приводить события к единому формату;
- осуществлять хранение событий;
- формировать информационные модели операторов системы и отчетные формы в режиме OLAP.

Собранные данные должны подвергаться корреляции и формировать информационную модель (специальный интерфейс) операторов.

Средства поиска, предоставляемые оператору, должны позволять осуществлять оперативное и всестороннее расследование инцидентов.

**Модели для СПНР деятельности оператора в системе управления информационной безопасностью.** Управление инцидентами является достаточно сложным процессом при реализации всех процедур. Поэтому при внедрении описанного процесса, как правило, прибегают к средствам

автоматизации. Однако, представленные на рынке программных продуктов системы не в полной мере решают проблему информационной поддержки принятия решений оператором-руководителем. Известные программы не позволяют оператору-руководителю в условиях информационной напряженности и дефицита времени оценить последствия распределения работ и выбрать оптимальный вариант.

Основными проблемами являются:

- Каким операторам поручить работы по устранению нарушений?
- Как диагностировать причины нарушения?

В связи с этим нами разрабатываются элементы СППР, позволяющие:

- оценить вероятность безошибочного реализации алгоритмов деятельности по устранению нарушений конкретными операторами и таким образом предложить оптимальную технологию решения задачи;
- документировать возникающие дефекты с указанием возможных причин их возникновения (База данных «Проблемы (ошибки)»);
- на основе анализа информации, накопленной в Базе данных «Проблемы» с использованием моделей DATA MINING (нейронная сеть, fuzzy logic, деревья решений, байесовские модели и др.) оценивать возможные источники и причины нарушений.

Для задач проектирования и оптимизации деятельности используется методология функционально-структурной теории эргономических систем профессора Губинского А.И. [2], модели и программные средства [3–6].

#### Библиографический список

2. <https://www.osr.ru/os/2001/07-08/180310/>
3. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытание: Справочник/Под общ. ред. А. И. Губинского и В. Г. Елафрова. -М.: Машиностроение, 1993. -528с.
4. Lavrov, E. Mathematical models for the distribution of functions between the operators of the computer-integrated flexible manufacturing systems/N. Pasko, A. Krivodub, A. Tolbatov//Proceedings of the XIII-th international conference tcset'2016 «Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer sciences». -Lviv-Slavsko, Ukraine, february 23 -26, 2016. -p. 72–76.
5. Лавров Е.А., Пасьяк Н.Б., Федорова А.В., Плеханов Е. Диалоговый моделирующий квантитативный комплекс для эргономического обеспечения цифровых технологий управления // В сборнике: Цифровые технологии в образовании, науке, обществе Материалы XI (1) всероссийской научно-практической конференции, Петрозаводск, 27–30 ноября 2017 г. — Петрозаводск, 2017. — С. 87–90.
6. Лавров Е.А., Пасьяк Н.Б., Щербань Т.В., Михайленко Ю. С. Совершенствование цифровых технологий производства методами оптимального управления человеко-машинным взаимодействием// В сборнике: Цифровые технологии в образовании, науке, обществе Материалы XI (1) всероссийской научно-практической конференции, Петрозаводск, 27–30 ноября 2017 г.- Петрозаводск, 2017. - С. 90–94.



7. Lavrov, E. Ergonomics of IT outsourcing. Development of a mathematical model to distribute functions among operators /E. Lavrov, N. Pasko, A. Krivodub, N. Barchenko, v. Konsevich/ Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2016. -N.4 (80) -P. 32–40.

### ЭЛЕКТРОННЫЕ ФОРМЫ УЧЕБНИКОВ В НАЧАЛЬНОЙ ШКОЛЕ: ПЛЮСЫ И МИНУСЫ

**Е. А. Мальшенко, Т. А. Тимохина**

Средняя школа № 27

Петрозаводск

[malsh@mail.ru](mailto:malsh@mail.ru)

В статье рассматриваются преимущества и недостатки использования электронной формы учебников на примере учебно-методического комплекса «Перспективная начальная школа» (из опыта работы).

**Ключевые слова:** электронная форма учебника.

### THE ELECTRONIC FORM OF THE TEXTBOOK IN PRIMARY SCHOOL: PROS AND CONS

**E. A. Malyschenko, T. A. Timohina**

Secondary school № 27

Petrozavodsk

The article discusses the advantages and disadvantages of using electronic forms of textbooks for example educational and methodical complex «Prospective elementary schools» (from work experience)

**Key words:** electronic form of the textbook.

Нормативным обоснованием введения в образовательный процесс электронных форм учебников является федеральный закон РФ «Об образовании в Российской Федерации» N 273-ФЗ от 29.12.2012, статья 16 «Реализация образовательных программ с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий». А с 2015 года обязательное условие для включения учебника в федеральный перечень — наличие электронной формы.

С 2014 года наша школа работает по УМК «Перспективная начальная школа», который обеспечен как бумажными формами учебника, так и электронными. Исходя из опыта работы в начальной школе, попытаемся представить преимущества и недостатки ЭФУ издательства «Академиздат».

Электронные формы учебников (ЭФУ) по всем предметам являются электронными изданиями, по структуре, содержанию и художественному оформлению соответствующими печатным формам учебников и содержащими мультимедийные элементы и интерактивные ссылки, которые расширяют и дополняют содержание учебников.

**Преимущества:**

- Учебник обеспечивает системно-деятельностный подход к обучению, получение личностных, предметных, метапредметных результатов, помогает формировать исследовательские



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

Михайленко Ю.С.<sup>1</sup>, студент; Лавров Є.А.<sup>1</sup>, професор;  
Пасько Н.Б.<sup>2</sup>, доцент

<sup>1</sup>Сумський державний університет, м. Суми, Україна

<sup>2</sup>Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

Від 50 до 80% аварій в АСУ 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. В основі отримання кінцевого набору формул для безлічі типових функціональних структур (ТФС) лежить процедура переходу від «графа робіт», відповідної ТФС, до «графу подій» (рис. 1).

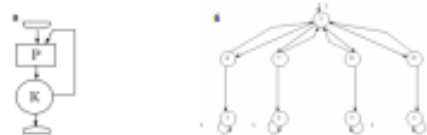


Рисунок 1 – ТФС «Робоча – контроль функціонування»  
а – граф робіт, б – граф подій

Розроблено метод базового графу та Н-функцій, який дозволяє отримувати математичні моделі для типових функціональних структур з урахуванням помилок різних типів. Запропонований метод використаний для двох типових функціональних структур: «Робоча операція з контролем функціонування» та «Робоча операція з контролем функціонування, доопрацюванням і повторенням робочої операції». Проведене комп'ютерне моделювання процесу обробки даних в системі роздрібної торгівлі з урахуванням двох типів найбільш важливих помилок дозволяють визначити ймовірність безпомилкового виконання, ймовірність виконання окремо з кожним типом помилки та математичне очікування часу виконання.

## Додаток Ж

### Копії актів впровадження



Карпуша В.Д.

2019 р.

**Акт**  
**Впровадження в навчальний процес**  
**СУМСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**  
**результатів наукової роботи**  
 студентки групи ІТ-51 Сумського державного університету  
 Михайленко Юлія Сергіївна  
 на тему

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

Складений 5 січня 2019 р. комісією у складі:

**Голова комісії:**

*Доцент кафедри комп'ютерних наук, зав. секції «Інформаційні технології проектування», кандидат технічних наук, доцент Шендрик В.В.*

**Члени комісії:**

1. Професор кафедри комп'ютерних наук, доктор технічних наук, професор **Лавров Є.А.**
2. Доцент кафедри комп'ютерних наук, кандидат технічних наук, доцент **Чибіряк Я.І.**
3. Старший викладач кафедри комп'ютерних наук, кандидат технічних наук, **Кузнєцов Е.Г.**

В період з 3 січня 2019 р. по 5 січня 2019 р. комісія провела роботу з визначення впровадження результатів Михайленко Ю.С. в навчальний процес кафедри комп'ютерних наук.

**Результати роботи комісії**

1. На кафедру комп'ютерних наук передано комплекс програм «Моделювання людино-машинної взаємодії в АСУ з урахуванням можливості виникнення і усунення помилок різних типів».
2. Матеріали використні в дисциплінах:
  - «**Ергономіка**» для слухачів магістратури, що навчаються за спеціальністю «Інформатика», при розробці теми «**Моделювання людино-машинної взаємодії**» (лабораторна робота – 2 год.).
  - «**Організація людино-машинної взаємодії**» для слухачів магістратури, що навчаються за спеціальністю «Інформаційні технології проектування», при розробці теми «**Ергономіка автоматизованих виробництв**» (лабораторна робота – 2 год.).

Голова комісії

Члени комісії

\_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Довідка про  
впровадження в ТОВ "СУ" СушиТехСервіс  
результатів дипломного проекту

студентки групи ІТ-51 Сумського державного університету  
Михайленко Юлії Сергіївни  
на тему  
«Моделювання людино-машинної взаємодії в АСУ з урахуванням  
можливості виникнення і усунення помилок різних типів»

Передаю математичні моделі та інформаційну технологію для підтримки  
діяльності керівників і служб підприємства.

Керівник підприємства



## Додаток 3

## Копії дипломів студентських наукових робіт

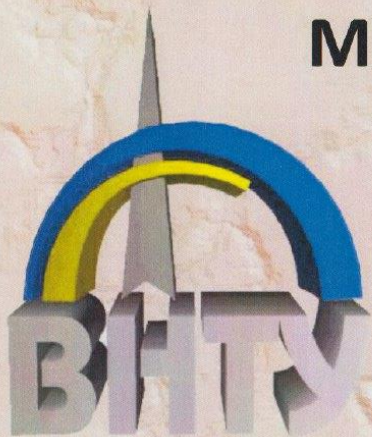




**Міністерство освіти і науки України**  
**Вінницький національний технічний університет**

Дипломом переможця 4 ступеня нагороджується

**МИХАЙЛЕНКО Юлія Сергіївна**



**Сумський державний університет**

Всеукраїнський конкурс  
студентських наукових робіт з напрямку  
«Інформатика і кібернетика»

Вінниця

12-13 квітня 2018 р.

Голова конкурсної комісії,  
проректор з наукової роботи ВНТУ, д.т.н., проф



*[Signature]* С. В. Павлов