ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕКОНОМІКИ, УПРАВЛІННЯ, ПРАВА ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Освітньо-професійна програма
Інформаційні управляючі системи та технології
Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології
Ступінь вищої освіти Магістр

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

_____Юрій УТКІН

«15» грудня 2022 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«Моделювання оцінювання надійності відмовостійких комп'ютерних систем з урахуванням змінних параметрів потоків відмов і відновлень програмних засобів»**

виконав здобувач вищої освіти денної форми навчання

Гаркавенко Євгеній Сергійович

Керівник кваліфікаційної роботи
д. т. н., доцент Олег ОДАРУЩЕНКО

Полтава – 2022 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК …… 7
ВСТУП……..... 8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ……..... 12
1.1 Аналіз структурної організації відмовостійких комп'ютерних систем ... 12
1.1.1 Аналіз вимог до надійності відмовостійких комп'ютерних систем .. 12
1.1.2 Аналіз архітектур відмовостійких комп'ютерних систем …….. 15
1.1.3 Аналіз функціонування програмних засобів відмовостійких комп'ютерних систем …….. 16
1.2 Аналіз методів моделювання при оцінюванні надійності відмовостійких комп'ютерних систем ……..... 19
1.3 Обґрунтування математичного апарату досліджень …… 23
1.3.1 Особливості математичного апарату марковських випадкових процесів …… 23
1.3.2 Моделі працездатність і ремонтопридатності апаратних і програмних засобів …… 25
1.3.3 Облік зміни параметрів потоків подій при моделюванні стійких до відмов комп'ютерних систем …….. 26
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС СТАНІВ ВІДМОВОСТІЙКИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ …… 29
2.1 Основні терміни і допущення, прийняті при побудові вкладених ланцюгів маркова …… 29
2.2 Регуляризація варіантів зміни параметрів потоків відмов та відновлення при побудові вкладених марковських ланцюгів …… 31
2.3 Послідовність математичного опису станів відмовостійких комп'ютерних систем, заснованого на поданні їх моделей у вигляді повторюваних фрагментів ……..... 33
2.4 Розробка базових макромоделей для типових варіантів функціонування логічної структури відмовостійких комп'ютерних систем . 35

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ …… 41
3.1 Розробка обчислювального алгоритму і програмного забезпечення чисельного дослідження вкладених марковських ланцюгів …….. 41
3.2 Розробка обчислювального алгоритму експоненціального методу …… 42
3.3. Техніко-економічне обґрунтування розробки програмного продукту ... 46
3.4. Методичні рекомендації щодо використання розробленого програмного забезпечення в навчальному процесі …….. 47
ВИСНОВКИ …… 57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ …….. 59
ДОДАТКИ …… 65

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

АЗ – Апаратні засоби

БММ – Базова макромодель

ВКС – Відмовостійка комп'ютерна система

ВЛМ – Вкладена ланцюг маркова

ВПП – Випадковий процес

ВЗК – Вбудовані засоби контролю

ДП – Дефекти проектування і виробництва

ДР – Диференціальне рівняння

ДФ – Фізичні дефекти

ЕОМ – Електронно-обчислювальна машина

ІТ – Інформаційна технологія

ОПР – Особа, що приймає рішення

МН – Модель надійності

БФМ – Багатофрагментна модель

НМП – Напівмарковський процес

НТЗ – Науково-технічна задача

ОФМ – Однофрагментна модель

ПН – Показник надійності

ПЗ – Програмні засоби

СДР – Система диференціальних рівнянь

ССН – Структурна схема надійності

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Поступальний розвиток суспільства, перетворення економіки, зростання виробництва, вирішення проблем забезпечення безпеки держави неможливе без розробки та реалізації проектів складних технічних комплексів. При цьому складно уявити етап проєктування таких систем без застосування їхнього моделювання. Моделювання дозволяє провести дослідження складних систем, які можуть бути виконані традиційними методами. Воно істотно знижує терміни і вартість проєктування і за рахунок аналізу великої кількості варіантів підвищує ефективність системи, що розробляється. Зокрема, моделювання дозволяє знизити витрати при оцінюванні надійності, живучості та безпеки складних систем, оскільки при реальних випробуваннях необхідно відстежувати відмови та поломки дорогого обладнання. Насамперед це стосується систем, до надійності, живучості та безпеки яких висуваються жорсткі вимоги [1]. До таких систем належать літальні (авіаційні, ракетні та ракетно-космічні) комплекси, технічні та організаційно-технічні комплекси критичного застосування; ядро яких на даний момент реалізується у вигляді спеціалізованих стійких до відмови комп'ютерних систем (ВКС). Вартість розробки, виробництва, випробувань різних ГКС для деяких типів комплексів становить до 40% загальної вартості [2]. Порушення працездатності ВКС пов'язане з проявом внутрішньосистемних дефектів та помилками обслуговуючого персоналу [3]. На сьогодні прийнято розглядати дві групи системних дефектів: фізичні дефекти (ДФ), елементів апаратних засобів (АС), а також дефекти проєктування та виробництва (ДП), насамперед програмних засобів (ПС), які виявилися не виявленими у процесі налагодження та випробувань, а з'явилися під час використання систем за призначенням [4].

Аналіз досвіду розробки, випробувань та експлуатації різних ВКС показує, що ДП стають ваговим фактором ненадійності, який має тенденцію

сталого наростання [4]. За оцінками фахівців, 20-70% випадків порушення функціонування складних систем обумовлюється ДП, які не виявлені при налагодженні програм. Внаслідок цього активно використовуються різні методи усунення ДП, які на певних етапах життєвого циклу системи можуть зумовити як зменшення, і збільшення інтенсивності потоку відмов ПЗ ВКС.

Питаннями розвитку теорії відмовостійких систем, методів оцінювання, забезпечення безвідмовності та готовності ВКС протягом останніх десятиліть активно займалися А. Авіженіс [3], Ж.-К. Лапрі [3,5], Б. Рендел [3,6], К. Триведі [7-9], Б. Конорєв [4,12], В. Харченко [2,4,10]. При цьому основна увага приділялася моделям функціонування апаратної компоненти ГКС з урахуванням заходів відновлення та техобслуговування [10,13,14]. Щодо досліджень, пов'язаних з використанням та вдосконаленням ПЗ ВКС, то у відомих роботах [7 9] автори обмежилися аналізом надійності їх вихідного варіанту без урахування змін параметра інтенсивності відмов при усуненні програмних дефектів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Робота відповідає дослідженням в межах науково-дослідної тематики «Теоретичні основи, методи та інформаційні технології розробки програмно-технічних комплексів критичного застосування в умовах ресурсних обмежень» (ДР№ 0112U001058).

Мета досліджень - є підвищення точності моделювання та оцінки надійності (готовності) ВКС на основі деталізації множини станів систем з урахуванням зміни параметрів потоків відмов та відновлення ПЗ.

Завданнями кваліфікаційної роботи є:

- виконати аналіз існуючих математичих методів моделювання та обчислювальння систем досліджуваного класу;

- розробити та дослідити комплекс марківських моделей оціювання надійності ВКС, які базуються на їх багатофрагментному поданні та враховують зміну інтенсивностей відмов та відновлення ПЗ;

- модифікувати експоненційний метод чисельного розв'язання жорстких систем диференціальних рівнянь Колмогорова - Чепмена з метою оцінки надійності ВКС.

Об'єкт дослідження – процеси моделювання та оцінювання надійності ВКС.

Предмет дослідження – методи та засоби моделювання та оцінювання надійності ВКС з урахуванням зміни параметрів потоків відмов та відновлення ПЗ.

Методи дослідження. Проведені в роботі дослідження ґрунтуються на методах теорії ймовірностей, системного та марківського аналізу, які використовувалися при розробці методу математичного опису станів та комплексу марківських моделей надійності ГКС; математичної статистики, імітаційного моделювання для побудови імітаційної моделі функціонування ВКС в умовах зміни параметрів потоків відмов та відновлення ПЗ.

Інформаційна база кваліфікаційної роботи сформована з наукових фахових статей, наукових монографій, аналітичних звітів державних та міжнародних експертних груп щодо експлуатації критичних технічних систем, виконаних науково-дослідних та дисертаційних робот заданою тематикою.

Елементи наукової новизни роботи полягають в удосконаленні марківських моделей оцінювання надійності ВКС, які базуються на їхньому багатофрагментному поданні та враховують зміну інтенсивностей відмов та відновлення ПЗ, що дозволяє підвищити точність моделювання та оцінки показників надійності. Отримав подальший розвиток (модифікований) експоненційний метод чисельного розв'язання жорстких систем диференціальних рівнянь Колмогорова, що базується на застосуванні процедури обчислення кроку інтегрування в залежності від максимального значення елемента матриці коефіцієнтів та обраної константи, що дозволяє зменшити витрати машинного часу при розрахунку показників надійності ВКС.

Практична значущість роботи полягає в розроблені програмної реалізації модифікованого експоненційного методу розв'язання жорстких систем диференціальних рівнянь (СДУ) Колмогорова-Чепмена із заданою точністю та кількістю ітерацій.

Апробація результатів дослідження відбувалася шляхом оприлюднення доповідей на міжнародній та студентській конференціях.

Публікації. За результатами проведеного дослідження опубліковані тези: «Моделювання оцінювання надійності відмовостійких комп’ютерних систем з урахуванням змінних параметрів потоків відмов і відновлень програмних засобів», матеріали щорічної студентської наукової конференції Полтавського державного аграрного університету, 10 листопада 2022 р. Полтава: ПДАУ, 2022.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків, де: додаток А – лістинг програми чисельного розв’язку систем диференціальних рівнянь. Загальний обсяг роботи становить 77 сторінок; робота містить 18 рисунків; 5 таблиць; список використаних джерел, що включає 50 найменувань.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

1.1 Аналіз структурної організації відмовостійких комп'ютерних систем

1.1.1 Аналіз вимог до надійності відмовостійких комп'ютерних систем

Однією з основних проблем побудови ВКС залишається завдання забезпечення їх тривалого функціонування. Це завдання розглядається в аспекті трьох складових: надійності, готовності і зручності обслуговування. Всі ці складові припускають, в першу чергу, боротьбу з несправностями системи, породжуваними відмовами і збоями в її роботі. Ця боротьба ведеться за всіма трьома напрямками, які взаємопов'язані і застосовуються спільно. Підвищення надійності ґрунтується на принципі запобігання несправностей шляхом зниження інтенсивності відмов і збоїв за рахунок застосування електронних схем і компонентів з високим і надвисоким ступенем інтеграції, зниження рівня перешкод, полегшених режимів роботи схем, забезпечення теплових режимів їх роботи, а також за рахунок удосконалення методів збирання апаратури. Підвищення готовності припускає придушення в певних межах впливу відмов і збоїв на роботу системи за допомогою засобів контролю та корекції помилок, а також засобів автоматичного відновлення обчислювального процесу після прояву несправності, включаючи апаратурну і програмну надмірність, на основі якої реалізуються різні варіанти відмовостійких архітектур. Таким чином, основні експлуатаційні характеристики системи істотно залежать від зручності її обслуговування, зокрема від ремонтопридатності, придатності до контролю т.д. Відповідно, однією з важливих характеристик ВКС є показник надійності (ПН), який повинен охоплювати перераховані властивості системи.

Вибір номенклатури показників надійності здійснюють на основі класифікації систем за ознаками, що характеризують їх призначення, наслідки відмов і досягнення граничного стану, особливості режимів застосування й т.д. Вибір оцінюваних показників надійності ВКС доцільно проводити згідно з прийнятою системою класифікації. За зазначеної класифікації ВКС розглядається як система конкретного призначення виду I (яка в процесі експлуатації може знаходитися в двох станах – працездатному або непрацездатному), відновлювана, що обслуговується, безперервного тривалого застосування. Шуканий ПН повинен враховувати, як структуру побудови системи, так і умови її функціонування. Для відновлюваних систем безперервного функціонування, вихідний ефект від застосування яких пропорційний сумарної тривалості перебування системи в працездатному стані, основним показником є коефіцієнт готовності, який дорівнює ймовірності того, що об'єкт опиниться в працездатному стані в довільний момент часу, окрім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається. Для окремого класу відновлюваних обслуговуваних ВКС багаторазового циклічного застосування як ПН використовується коефіцієнт оперативної готовності Ко.г., що дорівнює ймовірності того, що об'єкт опиниться в працездатному стані в довільний момент часу, окрім планованих періодів протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачається, і починаючи з цього моменту, буде виконувати необхідні функції протягом заданого інтервалу часу.

В останні роки в літературі з обчислювальної техніки все частіше вживається термін «системи високої готовності» (High Availability System). Головними характеристиками систем високої готовності в порівнянні зі стандартними є знижена частота відмов і більш швидкий перехід до нормального режиму функціонування після виникнення несправності за допомогою швидкого відновлення програм і мережевих сесій до того стану, в якому вони перебували в момент відмови системи. Слід зазначити, що методи підвищення надійності сучасних апаратних засобів ВКС дозволяють

забезпечити напрацювання до відмови близько n×105 годин без застосування резервування. Для ПЗ середнє напрацювання до відмови становить n×103 годин. Однак при цьому середня тривалість відновлення АЗ становить кілька десятків годин, а середня тривалість відновлення ПЗ (методом перезапуску) – від декількох хвилин до декількох годин. Слід зазначити, що в багатьох випадках користувачів цілком може влаштувати навіть невеликий час простою в обмін на меншу вартість системи високої готовності в порівнянні із значно вищою вартістю забезпечення режиму безперервної готовності [23,31].

Час простою при перемиканні системи на резервну для ВКС може змінюватися в діапазоні від кількох секунд до 20 і більше хвилин. Процедура переключення на резерв включає в себе наступні етапи: резервна машина виявляє відмову основної і потім слідує приписами керуючої програми (скрипта), яка найімовірніше включає перезапуск системи, передачу адрес користувачів, отримання і запуск необхідних програм, а також виконання певних кроків із забезпечення коректного стану даних. Час відновлення залежить головним чином від того, наскільки швидко друга машина зможе отримати і запустити програми, а також від того, наскільки швидко операційна система і додатки, такі як бази даних або монітори транзакцій, зможуть отримати приведені в порядок дані. У загальному випадку апаратне переключення на резерв займає по порядку величини одну - дві хвилини, а система перезавантажується за наступні одну - дві хвилини. У більшості випадків від 5 до 20 хвилин потрібно на те, щоб отримати і запустити програму з повністю відновленими даними.

За зазначених тимчасових характеристик відмов та відновлення АЗ та ПЗ ВКС, значення коефіцієнта готовності буде наближатися до одиниці. Прийнято виділяти класи чи рівні готовності системи, як показано в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вимоги до надійності ВКС

№ п/п	Значення$K_Г$	$T_{пр}$ 1/год	Характеристика системи
1	0,9	876 год	Не обслуговується, некерована (unmanaged)
2	0,99	87 год 36 хвилин	Обслуговується, керована (managed)
3	0,999	8 год 46 хвилин	Добре обслуговується, добре керована (well-managed)
4	0,9999	52 хвилин 33 секунд	Стійка до відмов (fault-tolerant)
5	0,99999	5 хвилин 15 секунд	З високою готовністю (high-availability)
6	0,999999	31,54 секунд	З дуже високою готовністю (very-high-availability)
7	0,9999999	3,15 секунд	З ультрависокої готовністю (ultra-availability)

У зв'язку з тим, що значення показника $K_Г$ сучасних ВКС можуть відповідати п'яти і більше «дев'яток», для зручності подання як показник надійності можна використовувати коефіцієнт неготовності, позначений як $U(t)$, який визначається з вираження:

$$U(t) = 1 - K_Г(t) \tag{1.1}$$

Високі вимоги, пропоновані до показників готовності сучасних ВКС, в свою чергу обумовлюють вимоги до точності моделювання цих систем на етапах проектування, виробництва і приробітки. Так, при визначенні $K_Г$ для ВКС п'ятого рівня (0,99999), точність результатів моделювання системи повинна бути близько 10^{-6} [24].

1.1.2 Аналіз архітектур відмовостійких комп'ютерних систем

Конфігурації ВКС, пропоновані сучасною комп'ютерною промисловістю, простягаються в широкому діапазоні від найпростіших схем, що забезпечують дублювання основної системи перед окремим гарячим резервом у співвідношенні 1:1, до кластерних схем, що дозволяють одній системі підхопити роботу будь-якої з декількох систем в кластері у разі їх несправності. При цьому під кластеризації розуміють об'єднання ЕОМ, що представляє єдине ціле для операційної системи, системного програмного

забезпечення, прикладних програм і користувачів. На ринку стійких до відмов обчислювальних систем найбільш відомі наступні виробники: Stratus Computer Systems, Compaq Computer, IBM, Marathon Technologies і Hewlett-Packard.

Аналіз архітектурних рішень компаній, що випускають і поставляють відмовостійкі обчислювальні системи показав, що як правило компоненти систем дублюються і троіруются на рівні материнських плат і мають велику надмірність на рівнях більш дрібних компонент системи. Таким чином, основними (базисними) архітектурами побудови ВКС є системи, які мають дворазове і триразове резервування основних елементів. Для найбільш відповідальних систем застосовується резервування більшої кратності. При цьому цілком очевидно, що мова йде виключно про апаратну надійність та спроможність системи до самодіагностики і реконфігурації апаратної частини. При використанні однакових версій ПЗ у всіх логічних комп'ютерах сервера прояв ДП ПЗ та спотворення оброблюваних даних виявлено не буде з усіма наслідками, що випливають з цього [24-29].

1.1.3 Аналіз функціонування програмних засобів відмовостійких комп'ютерних систем

На сучасному етапі для складних ПЗ великого обсягу в аспекті прояву виділяють три класи дефектів [33-36]:

– Дефекти-«борбагі» (bohrbug), що обумовлюють стабільні несправності, які проявляються в строго певних умовах і пов'язані з неповнотою тестування та верифікації ПЗ, некоректно конфігураційних даних та інше;

– Дефекти-«гейзенбагі» (heisenbug), що обумовлюють перемежовуючи несправності, які зникають або видозмінюються при спробі їх виявлення;

– Дефекти «старіння» ПЗ (aging related bug), що обумовлюють накопичення помилок в процесі експлуатації ПЗ.

Для боротьби із зазначеними класами дефектів ПЗ застосовуються різні методи. Так, складність виявлення причин появи heisenbug ускладнює повне

їх усунення. Але з огляду на велику ймовірність того, що після перезапуску умови, за яких виявився heisenbug, зміняться і малу тривалість перезапуску ПЗ, для зменшення наслідків прояву даного класу дефектів застосовують розподілені структури ВКС. У такому випадку ймовірність одночасної появи умов, за яких виявиться heisenbug на рознесених комплексах невисока.

Для зменшення наслідків прояву дефектів «старіння» застосовують метод «модернізації» ПЗ, суть якого полягає у повному або частковому відновлення вихідних (нульових) значень змінних середовищ, використовувані ПЗ для проміжних розрахунків (наприклад, заповнення масивів оперативної пам'яті, дані реєстру та т.д.).

Високу ефективність зменшення наслідків зазначених трьох класів дефектів ПЗ показала практика використання діверсних продуктів. Тому нормативні документи та практика розробки ВКС вимагає використання версійної надмірності, різноманітності або багатоверсійності (діверсності). Під діверсністю мається на увазі застосування в різних системах (або в межах однієї системи в різних каналах) різних засобів та / або аналогічних засобів, заснованих на різних принципах дії, для здійснення заданої функції.

Діверсность ПЗ, що вноситься на етапі проектування (design multiversity), мінімально залежить від безпосередніх виконавців. Внутрішня діверсность повністю визначається використовуваними технічними рішеннями, які вибираються розробниками, безпосередньо реалізують конкретні ПЗ.

Наприклад, в ВКС ПТК АЕС застосовуються основні та діверсні комплекти, реалізовані шляхом застосування в різних комплектах різних програмно-апаратних засобів, а також різних підходів до розробки і різних команд розробників. Таким чином, для реалізації різноманіття в ВКС ПТК АЕС одночасно застосовані наступні чотири способи:

1) апаратна діверсность – різноманітність досягається за рахунок використання різних технічних засобів (різних виробників або побудованого за різними технологіями, наприклад, з використанням різної елементної

бази).

2) програмна діверсность – різноманітність досягається за рахунок використання різних версій ПЗ;

3) проектна діверсность – різноманітність досягається за рахунок застосування різних методів (підходів) проектування апаратних чи програмних засобів;

4) суб'єктна діверсность – різноманітність досягається за рахунок використання різних виконавців робіт (команд виконавців).

Крім того, одним із способів усунення дефектів ПЗ є оновлення функціонуючих ПЗ на етапі експлуатації. Проте, в процесі оновлення можливо як усунення дефектів ранніх версій ПЗ, так і внесення нових дефектів, що пов'язано з розширенням функціональності програмної продукції.

Таким чином, можна виділити наступні варіанти функціонування ВКС при прояві ДП ПЗ.

1. Після прояви ДП система зупиняється і простоює до моменту, коли ДП буде локалізований і усунутий в програмному коді, або в конфігураційних даних. Такий варіант характерний при прояві всіх класів ДП на етапі тестування систем і етапі експлуатації ВКС критичних комплексів, в яких реалізована діверсность ПЗ. Також такий варіант можливий при прояві bohrbug, які полягають у помилках конфігураційних даних, на початковому етапі експлуатації бізнес-критичних та телекомунікаційних ВКС, побудованих на основі типових структур. Слід зазначити, що після локалізації та усунення кількість ДП ПЗ зменшується, що обумовлює зменшення інтенсивності потоку відмов ВКС в цілому.

2. Після прояви ДП виконується перезапуск ПЗ і система продовжує функціонувати від останньої збереженої контрольної точки. Це класичний випадок функціонування ВКС при проявах heisenbug і aging related bug. Передбачається, що після перезапуску ПЗ умови, за яких виявився ДП зміняться, а сама причина відмови буде усунена пізніше при оновленні або

модернізації ПЗ. Такий варіант прийнятний для бізнес-критичних ВКС, побудованих за розподіленої або розосередженої структури на етапі пізньої експлуатації, коли передбачається, що ймовірність прояви bohrbug несуттєва. У таких випадках можливі як сталість параметрів прояви ДП на проміжках між оновленнями ПЗ, так і збільшення інтенсивності aging related bug до моменту проведення модернізації ПЗ.

Таким чином, складність апаратної і логічної структур ВКС, а також різні варіанти функціонування системи при прояві ДП обумовлюють застосування специфічних методів моделювання при оцінюванні надійності ВКС.

1.2 Аналіз методів моделювання при оцінюванні надійності відмовостійких комп'ютерних систем

Моделювання є важливим етапом проектування електронної апаратури. Воно дозволяє провести дослідження складних систем, які не можуть бути виконані традиційними методами. Моделювання істотно знижує строки і вартість проектування і за рахунок аналізу великої кількості варіантів підвищує ефективність системи, що розробляється. Існує безліч різних методів моделювання (рис. 1.1), кожен з яких характеризується своєю областю застосування.

Одним із найважливіших інструментів автоматизованого проектування є цифрове моделювання на ЕОМ об'єктів, що проектуються, що подаються у вигляді математичних моделей. Математична модель – це система математичних конструкцій (чисел, змінних, матриць, множин і т.д.) і відносин між ними, які адекватно відображають істотні з інженерних позицій властивості модельованого об'єкту або явища.

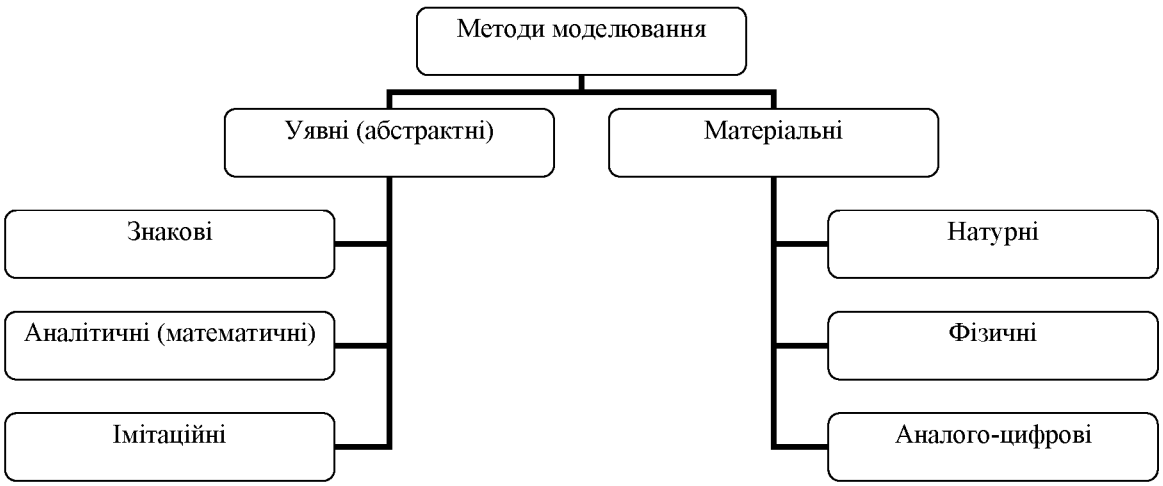


Рисунок 1.1 – Класифікація методів моделювання складних систем

Методи моделювання ґрунтуються на теорії подібності, яка базується на трьох основних теоремах і низку додаткових положень і оперує з визначальними критеріями. Критерії подібності визначають масштаби, що пов'язують параметри моделі і оригіналу, і виявляють найбільш характерні властивості модельованого явища.

Модель і відображаємий з її допомогою об'єкт перебувають у відношенні схожості, а не тотожності. Надмірні відмінності між моделлю та оригіналом можуть позбавляти модель її пізнавального значення. Таким чином, з можливих методів моделювання слід вибрати метод, який найкращим чином відповідає завданням і можливостям дослідження.

При одержанні на основі моделювання характеристик явищ необхідно враховувати фактори, що обумовлюють розбіжність результатів, одержуваних в моделі і оригіналі:

а) похибки визначення окремих параметрів, що входять в критерії подібності;

б) неточності вихідного математичного опису явища;

в) похибки в отриманні критеріїв подібності за рахунок свідомо спрощеного уявлення явища при його вивченні;

г) випадкові відхилення параметрів оригіналу й моделі від прийнятих (розрахункових);

д) похибки проведення дослідів, відхилення фактичних параметрів режиму від розрахункових і т.д.;

е) похибки обробки результатів моделювання.

Характерним прикладом ефективного застосування моделей і методів моделювання є аналіз надійності складних систем. Аналіз надійності проводять на всіх етапах життєвого циклу, при цьому основний обсяг робіт має проводитися на стадії проектування. Виділяють два основні підходи до аналізу надійності:

– аналіз надійності за результатами заходів та способів щодо забезпечення надійності на етапах проектування, виробництва та експлуатації;

– кількісні методи аналізу надійності, засновані на аналізі умов експлуатації, причин і механізмів відмов, показників надійності, елементів і т.д.

Виконанню будь-якого кількісного аналізу надійності системи (об'єкта) передує якісний аналіз, який може бути здійснений дедуктивним (зверху вниз) або індуктивним (знизу вгору) методом. На практиці частіше застосовується ітеративний підхід, коли дедуктивний і індуктивний аналізи доповнюють один одного.

Виділяють наступні методи математичного моделювання при аналізі надійності складних систем:

– аналіз видів і наслідків відмов;

– аналіз діагностичного дерева відмов;

– аналіз за допомогою блок-схеми надійності;

– лямбда-метод;

– марковський аналіз;

– ймовірносно-фізичний аналіз.

Аналіз видів і наслідків відмов являє собою індуктивний (знизу вгору) метод аналізу надійності, який підходить для вивчення дефектів матеріалу, елементів і обладнання, а також механізмів їх впливу на наступний, більш

високий функціональний рівень системи.

Аналіз діагностичного дерева відмов – це дедуктивний (зверху вниз) метод аналізу надійності системи. За допомогою даного методу визначають і аналізують умови та фактори, які призводять до виникнення небажаної події чи сприяють цьому, а також значно впливають на характеристики системи, безпеку, економічність і інші показники.

Аналіз за допомогою блок-схеми надійності – це дедуктивний (зверху вниз) метод аналізу надійності системи, який дозволяє визначити шляхи сприятливого стану системи по тому, як пов'язані між собою блоки (підсистеми-елементи).

Прогнозування надійності за кількістю елементів (лямбда-метод) – переважно індуктивний (знизу вгору) метод, який застосовується на стадіях технічної пропозиції і початкового проектування для приблизної оцінки інтенсивності відмов системи відповідно до рівнів завантаженості її елементів.

Марковський аналіз – це переважно індуктивний (знизу вгору) метод аналізу, заснований на теорії марковських процесів і використовується для оцінки функціонально складних систем і стратегій технічного обслуговування і ремонту.

Ймовірносно-фізичний метод аналізу надійності передбачає використання ймовірносно-фізичних моделей надійності, параметри яких мають конкретну фізичну інтерпретацію і пов'язують значення ймовірності відмови і фізичного (визначає) параметра, що приводить до відмови. Наприклад, математичні моделі процесів деградації у вигляді безперервних марковських процесів призводять до дифузійних розподілів напрацювання до відмови (граничного стану), параметр масштабу яких є середньою швидкістю зміни визначального параметра, а параметр форми збігається з коефіцієнтом варіації цієї швидкості.

З перерахованих вище методів математичного моделювання для оцінювання комплексних показників надійності ВКС зі складною апаратно-

логічної структурою з урахуванням відмов та відновлення АЗ та ПЗ застосовується марковський аналіз. Проте, припущення, що обумовлюють застосування теорії марковських процесів можуть не відповідати реальній обстановці функціонування ВКС. Це вимагає додаткових заходів у процесі обґрунтування математичного апарату досліджень[38-45].

1.3 Обґрунтування математичного апарату досліджень

1.3.1 Особливості математичного апарату марковських випадкових процесів

При моделюванні дискретних та цифрових систем використовується подання реальних явищ за допомогою випадкових процесів (ВП) змінюють своє значення в деякі моменти часу t_i і приймаючі значення x_k (k = 1…K). Залежно від виду розподілу ймовірностей $P_k^{(i)}$ виділяють такі різновиди ВПП [45]:

1) процес з незалежними значеннями, якщо імовірність $P_k^{(i)} = P_k$, тобто процес не залежить від передісторії;

2) процес незалежних випробувань – окремий випадок попереднього, коли простір результатів одне і те ж для різних кроків $\{L^{(i)}\} = \{L\}$;

3) Марковський процес (марковський ланцюг) володіє одним і тим же простором випадків (станів), а розподіл $P_k^{(i)}$ залежить тільки від результату попереднього кроку, тобто

$$P\left\{x^{(i+1)} = x_k^{(i+1)}\Big|_{x^{(0)}\ldots x^{(i)}}\right\} = P\left\{x^{(i+1)} = x_k^{(i+1)}\Big|_{x^{(i)}}\right\}. \qquad (1.2)$$

Апарат теорії марковських процесів знайшов застосування при вирішенні наступних завдань:

– ремонту та заміни обладнання;

– дослідження якості систем масового обслуговування;

– мережевого планування та управління;

– дослідження продуктивності систем керування;

– дослідження живучості та безпеки;

– визначення комплексних показників надійності систем зі складною структурою.

У загальному випадку марковський апарат дослідження ВКС при оцінюванні надійності реалізується у вигляді комплексу процедур, що включають наступні етапи.

1. Аналіз архітектури досліджуваної ВКС, її структурної схеми надійності з урахуванням різних дефектів АЗ і ПЗ, процедур відновлення при відмовах.

2. Визначення множини станів системи на основі комбінацій справних і несправних станів її елементів, станів відновлення і обслуговування. Визначення та аналіз підмножин працездатних, непрацездатних станів, станів простою системи в цілому.

3. Визначення, виходячи з результатів аналізу, можливості застосування апарату марковського моделювання.

4. Визначення кількісних початкових значень параметрів моделі на підставі відомих і розроблених методів, а також прийнятих припущень. Побудова розміченого графа станів і переходів системи.

5. Розробка та дослідження СДР Колмогорова, отримання кількісних значень ймовірностей перебування системи в кожному з станів S_i, $i \in 1 \ldots N$. Визначення кількісних значень комплексних показників надійності (готовності):

$$K_{\Gamma}(t) = \sum_{i:S_i \in MS_P} P_{S_i}(t) \tag{1.3}$$

$$K_{о.г.}(t,\tau) = \sum_{i:S_i \in MS_P} P_{S_i}(t) P_{БР\,i}(\tau) \tag{1.4}$$

При використанні апарату марковських випадкових процесів базовими є припущення про подання потоків відмов та відновлення ВКС як найпростіших (стаціонарних, ординарних, без післядії). У такому випадку параметри зазначених потоків приймаються постійними величинами. Слід зазначити, що, як правило, інтенсивності відмов та відновлення складної системи дуже складно спрогнозувати, їх можна визначити тільки

апостеріорна. Тим часом існують спеціальні моделі прогнозу параметрів потоків відмов (моделі безвідмовності) та відновлення (моделі ремонтопридатності) компонент ВКС (АЗ та ПЗ окремо) [46-50].

1.3.2 Моделі працездатність і ремонтопридатності апаратних і програмних засобів

Відомі десятки МН ПЗ, розроблених у 1970-2010 рр.. Однак зараз ситуація така, що кожна фірма-розробник ПЗ або інша організація, зацікавлена в кількісній оцінки надійності ПЗ, змушені вирішувати проблему для себе заново, з огляду на досвід і кваліфікацію програмістів і проектувальників, специфіку систем, що створюються, вимоги до їх надійності та безпеки, економічні аспекти та ін. Необхідність вирішення цієї задачі пов'язана з вузькою спеціалізацією більшості існуючих моделей і з труднощами вибору однієї з них для конкретних ПЗ.

Підхід, заснований на прагненні розробити модель оцінки надійності для чергового проекту або навіть групи проектів, є в певному сенсі екстенсивним. Альтернативний підхід може базуватися на систематизації множини відомих моделей, виборі і наступної настройки їх параметрів. На сьогодні існують також універсальні методи вибору МН ПЗ на етапах розробки та експлуатації ВКС.

Під надійністю функціонування ПЗ, як однією з властивостей, що визначають якість ПЗ, розуміється група властивостей, що обумовлює здатність ПЗ зберігати працездатність та перетворювати вихідні дані в потрібний результат у заданих умовах за встановлений період часу. Проте, слід пам'ятати, що ПЗ не схильні до зносу або старіння. Кількість і характер відмов, пов'язаних з ПЗ, є наслідком його внутрішніх дефектів (дефектів проектування) і залежить від умов його застосування. При цьому відмовою називається подія, що полягає в прояві не працездатності ПЗ, а помилкою – запис елемента програми або програмної документації, використання якої приводить (або може призвести) до непередбаченої ситуації.

1.3.3 Облік зміни параметрів потоків подій при моделюванні стійких до відмов комп'ютерних систем

Зміна параметрів прояви ДП ПЗ порушує основне допущення про маркові процеси, що протікають в ВКС. Це ставить під сумнів адекватність результатів моделювання надійності ВКС у разі усунення ДП ПЗ. Виходом із ситуації, що склалася є застосування апарату напівмарковського моделювання.

Напівмарковські процеси являють собою безпосереднє узагальнення добре вивчених в теорії ймовірності ланцюгів Маркова. Якщо час перебування елемента системи в будь-якому i-му стані до переходу в j-ий стан є випадкова величина з довільною функцією розподілу, то процес називають напівмарковських (НМП).

При вирішенні практичних завдань використовується наступний спосіб завдання НМП. Напівмарковський процес визначений, якщо задані:

1) граф станів, тобто стани $i = 1, 2, \ldots, n$ $(i \in N)$ і можливі переходи $\{ij\}$;

2) матриця $Q = Q_{ij}(t)$ незалежних функцій розподілу часу перебування елемента в i -му стані перед переходом в j-ий стан, якщо б такий вихід зі стану і був єдиним;

3) початковий стан у момент t = 0.

На основі цих вихідних даних можуть бути знайдені різні характеристики НМП, серед яких завжди визначаються ймовірності P_{ij} переходу зі стану i у стан j у момент стрибка, а також безумовні математичні очікування t_i часу перебування елемента в i-му стані.

Якщо переходи зі стану i у стан j відбуваються через одиницю часу, то НМП вироджується в ланцюг Маркова з дискретним часом. Напівмарковський процес, що розглядається тільки в моменти переходів, визначається матрицею $P = \{P_{ij}\}$, і, отже, зводиться до марківського ланцюга, в якій передісторія процесу до попадання в стан і не впливає на його подальшу поведінку. Такий марківський процес з неперервним часом, що міститься в напівмарковських, називають вкладеним марковськовим

ланцюгом (ВМЛ) і він утворюється при експоненційному розподілі часу перебування системи в кожному стані.

У разі прийняття припущень про постійність параметрів для моделювання систем при усуненні дефектів проектування порушуються вимоги до адекватності моделі, що призводить до відхилення результуючої функції. Аналіз літературних джерел показав, що існує можливість вирішення даної проблеми за допомогою розширення набору керуючих змінних, набору обмежень або їх комбінацій. Але при цьому зростає розмірність задач, напряму пов'язана зі зростанням кількості станів розміченого графа, що визначає матрицю коефіцієнтів системи диференціальних рівнянь Колмогорова. Кількість обчислювальних операцій, спрямованих на вирішення системи рівнянь підвищується із зростанням точності рішення.

Також при чисельному рішенні системи рівнянь виникає проблема жорсткості, пов'язана з відмінністю коефіцієнтів матриці більш ніж на 2 порядки і обумовлює збільшення обчислювальних витрат при зменшенні кроку інтегрування.

Таким чином, аналіз вимог до надійності ВКС, виявлені основні джерела відмов і недоліки існуючого науково-методичного апарату дозволяють обґрунтувати можливість адекватного застосування апарату марковських процесів для моделювання систем із змінними параметрами потоків відмов та відновлення.

Висновки до розділу 1

В розділи виконано аналіз структурної організації відмовостійких комп’ютерних систем, що надало змогу визначити набір базових архітектурних рішень щодо побудови досліджуваних систем. Виконано детальний аналіз сучасних вимог до надійності ВКС та математичних методів оцінювання цієї властивості. Обгрунтовано та обрано математичний апарат досліджень, визначені його особливості та шляхи модифікації.

Визначено, що системи досліджуваного класу мають особливості щодо кількісних значень надійнісних параметрів, що в свою чергу потребує вдосконалення математичного апарату досліджень.

Визначено, що зміна параметрів прояви ДП ПЗ порушує основне допущення про марковські процеси, що протікають в ВКС. Це ставить під сумнів адекватність результатів моделювання надійності ВКС у разі усунення ДП ПЗ. Зроблено висновок про те, що виходом із ситуації, що склалася є застосування апарату напівмарковського моделювання.

Напівмарковські процеси являють собою безпосереднє узагальнення добре вивчених в теорії ймовірності ланцюгів Маркова. Якщо час перебування елемента системи в будь-якому i-му стані до переходу в j-ий стан є випадкова величина з довільною функцією розподілу, то процес називають напівмарковських (НМП).

Сформульовані напрямки досліджень, завдання досліджень.

РОЗДІЛ 2
МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС СТАНІВ ВІДМОВОСТІЙКИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

2.1 Основні терміни і допущення, прийняті при побудові вкладених ланцюгів маркова

Проведений аналіз дозволив зробити висновок про те, що для адекватного моделювання ВКС при зміні параметрів потоків відмов та відновлення необхідно використовувати вкладені ланцюги маркова (ВЛМ). Для застосування апарату ВЛМ обґрунтовані наступні припущення.

1. Процес функціонування системи описується за допомогою графа з кінцевим числом вершин. Тому що при аналізі надійності розглядаються тільки працездатні і непрацездатні стану компонент ВКС, то кількість вузлів графа ВЛМ складе:

$$N_{ГР} \approx K_{Ф} \cdot N_{ГР0} = K_{Ф} \cdot 2^{(N_{АЗ}+N_{ПЗ})}, \qquad (2.1)$$

де: $K_{Ф}$ – кількість рівнів дискретизації при апроксимації змінюваних функцій λ (t), μ (t) ступінчастою функцією (зокрема, $K_{Ф}$ дорівнює кількості ДП ПЗ, не виявлених на ранніх етапах і усуваються при тестуванні);

$N_{ГР\,0}$ – кількість вузлів графа при постійних параметрах λ, μ;

$N_{ПЗ}$ – кількість версій ПЗ;

$N_{АЗ}$ – кількість резервованих каналів АЗ.

2. Зміна параметрів потоків відмов і відновлень стрибкоподібно і викликано тим, що виявлення та усунення ДП змінює параметр $N_{ош}$. Це дозволяє зробити висновок про перехід системи з одного стану в інший. Дійсно, якщо розглядати перший варіант функціонування логічної структури ВКС, при якому система простоює до повного усунення причин відмови ПЗ, то зміна параметра $\lambda_{ДП}$ відбувається в момент відновлення працездатного стану системи після відмови ПЗ.

3. Час перебування системи в кожному стані є випадковою величиною, розподіленою за експоненціальним законом.

Для випадку зміни інтенсивності відмов ПЗ запропоновано використовувати принцип багатофрагментності. Він полягає в представленні ланок ВЛМ у вигляді сукупності повторюваних фрагментів, що відрізняються одним або кількома параметрами.

Застосування цього принципу дозволяє:

– знизити розмірність розв'язуваної задачі;

– підвищити наочність досліджуваної моделі;

– більш повно врахувати особливості деяких режимів функціонування систем.

Запропоновано розширити застосування принципу багатофрагментності для формування ВЛМ і моделювання ВКС у випадках зміни не тільки параметрів потоку відмов, але і при комбінованій зміні параметрів потоків відмов і відновлень одночасно. При цьому запропоновано використовувати такі визначальні терміни.

Макромодель – модель, елементи якої є самостійними моделями (фрагментами), що описують поведінку ВКС на певному часовому інтервалі.

Базова макромодель (БММ) – макромодель типової структури ВКС з фіксованими варіантами зміни параметрів потоків відмов і відновлень.

Фрагмент (початковий, внутрішній, кінцевий) – типова самостійна частина макромоделі.

Зона фрагментів – підмножина фрагментів, в межах якого параметр (и) моделі змінюється по одному закону.

Макрограф – граф станів, відповідний макромоделі, і описує переходи між фрагментами.

У зв'язку з розширенням кількості непостійних параметрів потоків необхідно визначити можливі комбінації варіантів змін.

2.2 Регуляризація варіантів зміни параметрів потоків відмов та відновлення при побудові вкладених марковських ланцюгів

Як було відзначено, при побудові ВЛМ проводиться умовна апроксимація непостійної функції $\lambda(t)$ або $\mu(t)$ кусково-неперервної функцією. При цьому після зміни станів системи відбувається стрибкоподібна зміна величин λ або μ на певні значення $\Delta\lambda$ або $\Delta\mu$. Слід зазначити, що параметри $\Delta\lambda$ і $\Delta\mu$ можуть бути як постійними величинами і приводити до лінійного характеру зміни відповідної інтенсивності, так і змінними. В останньому випадку характер зміни інтенсивності прояву дефектів і відновлення буде носити нелінійний характер. Вид не лінійності можна визначити після дослідження характеру і "ваги" відповідного дефекту. Саме по собі таке визначення представляє собою окрему задачу.

Таким чином, для визначення комбінацій варіантів зміни параметрів потоків відмов та відновлення необхідно перебрати випадки λ = const, λ = var, μ = const, μ = var, $\Delta\lambda = 0$, $\Delta\lambda$ = const, $\Delta\lambda$ = var, $\Delta\mu = 0$, $\Delta\mu$ = const, $\Delta\mu$ = var. Результати перебору зведені в табл.2.2.

Таблиця 2.2 – Варіанти зміни параметрів λ, μ, $\Delta\lambda$ и $\Delta\mu$

№ п/п	λ	μ	$\Delta\lambda$	$\Delta\mu$
1	const	const	0	0
2	var	const	const	0
3	var	const	var	0
4	const	var	0	const
5	const	var	0	var
6	var	var	const	const
7	var	var	const	var
8	var	var	var	const
9	var	var	var	var

Створимо перелік БММ. Перша цифра числової послідовності визначає основні параметри $\lambda_{дп}$, $\mu_{вп}$. Друга - визначає номер варіанту характеру зміни параметрів $\lambda_{дп}$, $\mu_{вп}$. Третя - визначає номер варіанти зміни величин $\Delta\lambda_{дп}$ і $\Delta\mu_{вп}$. Четверта - визначає номер варіанта зміни величин $\Delta\lambda_{дп}$ і $\Delta\mu_{вп}$. Повна числова

послідовність визначає основний зміст базової макромоделі. Таким чином, отримані наступні варіанти зміни параметрів, що визначають характеристики надійності ПЗ ВКС:

БММ №1 (1.2.1.1) – $\Delta\lambda_{ДП}$ – величина постійна в кожному фрагменті, $\Delta\lambda_{ДП\,i} = const$, $i \in 1\ldots N$, де N – число фрагментів.

БММ №2 (1.2.1.2 и 1.2.2.1) – $\Delta\lambda_{ДП}$ – величина постійна в зоні фрагментів, $\Delta\lambda_{ДП\,i} \in \{\Delta\lambda_{ДП\,0}, \ldots, \Delta\lambda_{ДП\,Nz}\}$, де Nz – число зон фрагментів.

БММ №3 (1.2.2.2) – $\Delta\lambda_{ДП}$ – величина, що змінюється в кожному фрагменті, $\Delta\lambda_{ДП} \in \{\Delta\lambda_{ДП\,i}, \ldots, \Delta\lambda_{ДП\,N}\}$, де N - число фрагментів.

БММ №4 (1.3.1.1) – $\Delta\mu_{ВП}$ – величина постійна в кожному фрагменті $\Delta\mu_{ВП\,i} = const$, $i \in 1\ldots N$, де N – число фрагментів.

БММ №5 (1.3.1.2 и 1.3.2.1) $\Delta\mu_{ВП}$ – величина постійна в зоні фрагментів, $\Delta\mu_{ВП\,i} \in \{\Delta\mu_{ВП\,0}, \ldots, \Delta\mu_{ВП\,Nz}\}$, де Nz – число зон фрагментів.

БММ №6 (1.3.2.2) – $\Delta\mu_{ВП}$ – величина, що змінюється в кожному фрагменті, $\Delta\mu_{ВП} \in \{\Delta\mu_{ВП\,i}, \ldots, \Delta\mu_{ВП\,N}\}$, де N – число фрагментів.

БММ №7 (1.4.1.1) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{ДП}$ і $\mu_{ВП}$. Величини $\Delta\lambda_{ДП}$ та $\Delta\mu_{ВП}$ постійні у кожному фрагменті, де $\Delta\lambda_{ДП\,i} = const$, $\Delta\mu_{ВП\,i} = const$, $i \in 1\ldots N$, де N – число фрагментів

БММ №8 (1.4.2.1) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{ДП}$ і $\mu_{ВП}$. Величина $\Delta\lambda_{ДП}$ постійна в кожному фрагменті, $\Delta\lambda_{ДП\,i} = const$. Величина $\Delta\mu_{ВП}$ постійна в зоні фрагментів, $\Delta\mu_{ВП\,i} \in \{\Delta\mu_{ВП\,0}, \ldots, \Delta\mu_{ВП\,Nz}\}$, де Nz – число зон фрагментів.

БММ №9 (1.4.2.2) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{ДП}$ і $\mu_{ВП}$. Величина $\Delta\lambda_{ДП}$ постійна в кожному фрагменті, $\Delta\lambda_{ДП\,i} = const$. Величина $\Delta\mu_{ВП}$ змінюється в кожному фрагменті, $\Delta\mu_{ВП} \in \{\Delta\mu_{ВП\,i}, \ldots, \Delta\mu_{ВП\,N}\}$, де N – число фрагментів.

БММ №10 (1.4.3.1) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{ДП}$ і $\mu_{ВП}$. Величина $\Delta\mu_{ВП}$ постійна в кожному фрагменті, $\Delta\mu_{ВП\,i} = const$. Величина $\Delta\lambda_{ДП}$ постійна в зоні фрагментів, $\Delta\lambda_{ДП\,i} \in \{\Delta\lambda_{ДП\,0}, \ldots, \Delta\lambda_{ДП\,Nz}\}$, де Nz – число зон

фрагментів.

БММ №11 (1.4.3.2) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{дп}$ і $\mu_{вп}$. Величина $\Delta\mu_{вп}$ постійна в кожному фрагменті, $\Delta\mu_{вп\,i} = const$. Величина $\Delta\lambda_{дп}$ змінюється в кожному фрагменті, $\Delta\lambda_{дп} \in \{\Delta\lambda_{дп\,i}, \ldots, \Delta\lambda_{дп\,N}\}$, где N – число фрагментів.

БММ №12 (1.4.4.1) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{дп}$ і $\mu_{вп}$. Величини $\Delta\mu_{вп}$ та $\Delta\lambda_{дп}$ змінюються в кожному фрагменті.

БММ №13 (1.4.4.2) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{дп}$ і $\mu_{вп}$. Величини $\Delta\mu_{вп}$ та $\Delta\lambda_{дп}$ змінюються в зоні фрагментів.

Моделювання процесу функціонування обчислювальної системи в рамках параметрів БММ № 1,2,4,5,7 досить легко реалізується за допомогою математичного апарату марковських випадкових процесів з безперервним часом і дискретними станами. Внаслідок урахування зміни параметрів $\lambda_{дп}$ і $\mu_{в}$ на величини $\Delta\lambda_{дп}$ і $\Delta\mu_{вп}$ розмірність задачі значно зростає, тому ефективність моделювання ВЛМ падає, що призводить до необхідності застосування спеціальних методів, наприклад імітаційного моделювання.

2.3 Послідовність математичного опису станів відмовостійких комп'ютерних систем, заснованого на поданні їх моделей у вигляді повторюваних фрагментів

З урахуванням введених термінів, обґрунтованих припущень і розглянутих варіантів зміни параметрів потоків відмов та відновлення, можна сформувати послідовність дій з формування множини станів ВЛМ, а також групування станів в фрагменти і зони фрагментів. Така послідовність математичного опису станів ВКС буде мати такий вигляд.

1. Дослідження внутрішньо-системних процесів і виділення можливих подій, пов'язаних зі зміною $M\pi$ – множини параметрів потоків відмов та відновлення $\lambda_{дп}$, $\mu_{вп}$, $\lambda_{дф}$, $\mu_{дф}$. Зокрема, для процесів усунення ДП ПЗ виділяються події – прояв ДП як відмови ПЗ та відновлення ПЗ після

відмови, при яких змінюються параметри $\lambda_{дп}$, $\mu_{вп}$ (перша класифікаційна ознака).

2. Визначення підмножини параметрів відмов та відновлення, які змінюються в процесі функціонування системи $M\pi_{var} \in M\pi$. При обліку усунення ДП ПЗ необхідно вибрати одну з чотирьох комбінацій варіантів зміни параметрів потоків $\lambda_{дп}$, $\mu_{вп}$ відповідно до прийнятої політики усунення ДП на етапах тестування, верифікації та використання ВКС (друга класифікаційна ознака). Як правило, вибір комбінації обґрунтовується статистичними дослідженнями результатів функціонування подібних програмних продуктів.

3. Визначення можливості апроксимації ступінчастою лінійною функцією законів зміни $M\pi_{var}$. При зміні параметрів $\lambda_{дп}$, $\mu_{вп}$ необхідно вибрати комбінацію динаміки зміни параметрів $\Delta\lambda_{дп}$ і $\Delta\mu_{вп}$ в межах суміжних фрагментів БММ (третя класифікаційна ознака). У першу чергу можливість лінерізаціі функцій підтверджується діючими заходами щодо виявлення та усунення ДП, при яких дефект усувається після його прояви.

4. Побудова множини базових макромоделей $M_{БММ}$, кожна з яких ідентифікується унікальним набором класифікаційних ознак – варіантів зміни параметрів $M\pi_{var}$. Для цього в разі усунення ДП ПЗ необхідно визначити можливість подальшої деталізації ступінчастою апроксимацією функцій $\lambda_{дп}(t)$, $\mu_{дп}(t)$ в межах зон фрагментів (четверта класифікаційна ознака).

5. Вибір базової маркової макромоделі на підставі чотирьох класифікаційних ознак. Визначення методів обчислення параметрів моделі.

На підставі запропонованого методу формуються макрографи функціонування ВКС, які містять тільки фрагменти (для БММ 1, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12) або фрагменти, що згруповано в зони (для БММ 2, 5, 8, 10, 13). Слід розглянути базові макромоделі для типових варіантів функціонування логічної структури ВКС.

2.4 Розробка базових макромоделей для типових варіантів функціонування логічної структури відмовостійких комп'ютерних систем

Спираючись на зміст підрозділу 2.3, необхідно розробити множину БММ, що описують процес функціонування ВКС з урахуванням одного з варіантів зміни параметрів, що характеризують надійність програмної частини.

Для наочності фрагменти БММ представлені у вигляді шестикутника, усередині якого показаний граф функціонування двоканальної одноверсійної ВКС. Структурна схема надійності і однофрагментна модель даної системи представлені на рис. 2.2.

Макромодель, представлена на рис. 2.2, відповідає першому варіанту комбінацій параметрів, представлених в табл. 2.2 ($\lambda_{дп}$=const $\rightarrow$ $\Delta\lambda_{дп}$=0; $\mu_{вп}$=const $\rightarrow$ $\Delta\mu_{вп}$=0) і містить один фрагмент, що складається з набору функціональних станів (однофрагментна модель – ОФМ).

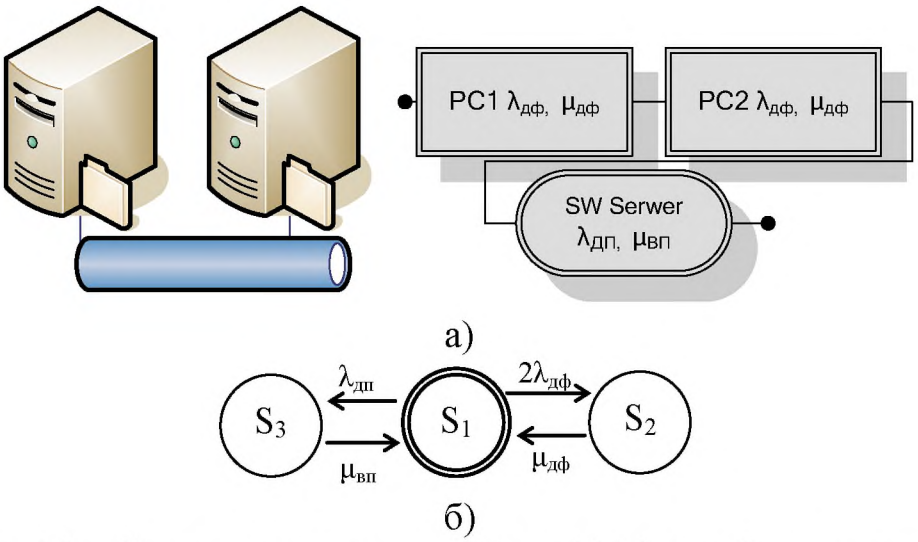


Рисунок 2.2 – Структурна схема надійності (а) і однофрагментний граф функціонування (б) дубльованої одноверсійної ВКС

Базовій макромоделі БММ № 1 (1.2.1.1) відповідає наступний варіант комбінації базових параметрів:

– Інтенсивність прояву ДП ПЗ є величина непостійна $\lambda_{дп}$= var;

– Величина зміни інтенсивності прояву ДП ПЗ $\Delta\lambda_{дп}$ є величина постійна і відповідно $\Delta\lambda_{дп}$=const для всіх внутрішніх фрагментів;

– Інтенсивність відновлення після прояви ДП ПЗ є величина постійна $\mu_{вп}$= const.

Макрограф представлений на рис. 2.3.

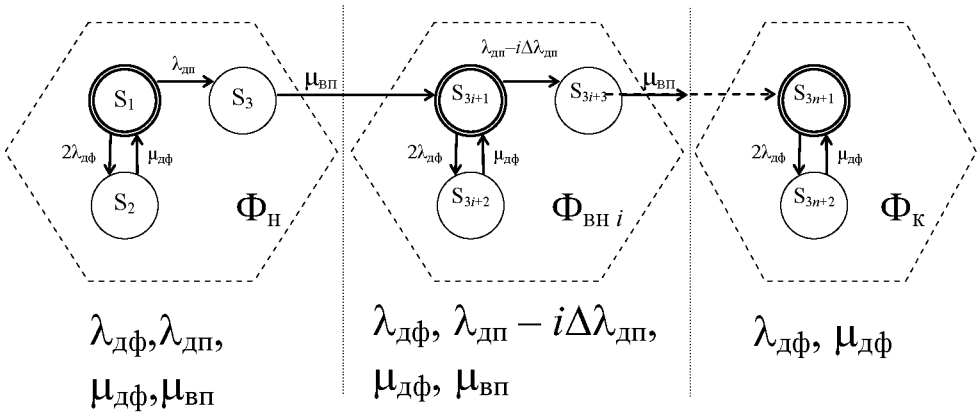


Рисунок 2.3 – Макрограф БММ№1 ($\lambda_{дп}$=var, $\mu_{вп}$=const, $\Delta\lambda_{дп}$=const, $\Delta\mu_{вп}$=0)

Він містить множину фрагментів $M_ф=\{Ф_н, M(Ф_{вн\ i}, i \in 1\ldots n), Ф_к\}$, де:

$Ф_н$ – початковий фрагмент,

$M(Ф_{вн\ i}, i \in 1\ldots n)$ – підмножина внутрішніх фрагментів,

$Ф_к$ – кінцевий фрагмент.

Перехід з одного фрагмента в іншої визначається зміною станів після відновлення ВКС через відмову ПЗ (перехід, позначений параметром $\mu_{вп}$). В загальному (граничному) випадку $Ф_н$ відповідають параметри $\lambda_{дф}$, $\lambda_{дп}$, $\mu_{дф}$, $\mu_{вп}$; $Ф_{вн\ i}$ відповідають параметри $\lambda_{дф}$, $\lambda_{дп(i)} = (\lambda_{дп(0)} - (i-1)\Delta\lambda_{дп})$, $\mu_{дф}$, $\mu_{вп}$, $i \in 1\ldots n$; $Ф_к$ відповідають параметри $\lambda_{дф}$, $\mu_{дф}$ и $\lambda_{дп}$=0.

Логіка функціонування полягає в наступному. Момент початку функціонування системи описується вихідним фрагментом. Перехід до внутрішніх фрагментів визначається послідовністю подій, які полягають у прояві ДП ПЗ та відновленні ПЗ після їх прояву. Переходи між внутрішніми фрагментами визначаються параметром $\mu_{вп}$. При цьому $\mu_{вп}$ залишається величиною постійною. В останньому фрагменті всі ДП ПЗ усунені і функціонування системи визначається параметрами $\lambda_{дф}$, $\mu_{дф}$.

Базовій макромоделі БММ № 2 ($\lambda_{дп}$=var, $\mu_{вп}$=const, $\Delta\lambda_{дп}$=var, $\Delta\mu_{вп}$=0) відповідає наступний варіант комбінації базових параметрів:

– Інтенсивність прояву ДП ПЗ є величина непостійна $\lambda_{дп}$= var;

– Величина зміни інтенсивності прояву ДП ПЗ $\Delta\lambda_{дп}$ є величина постійна в зоні фрагментів і відповідно $\Delta\lambda_{дп\,i} \in \{\Delta\lambda_{дп\,0}, \ldots, \Delta\lambda_{дп\,Nz}\}$, де Nz – число зон фрагментів;

– Інтенсивність відновлення після прояви ДП ПЗ є величина постійна $\mu_{дп}$= const.

Макрограф представлений на рис. 2.4.

Він містить множину фрагментів $M_ф=\{\Phi_н, M_{ФВН\,З\,1.i}(i \in 1\ldots n_1), \ldots M_{ФВН\,З\,Nz.j}(i \in 1\ldots n_{Nz}), \Phi_к\}$, де:

$\Phi_н$ – початковий фрагмент,

$M_{ФВН\,З\,k.i}$ $(i \in 1\ldots n_k)$ – підмножина внутрішніх фрагментів k-ї зони,

$\Phi_к$ – кінцевий фрагмент.

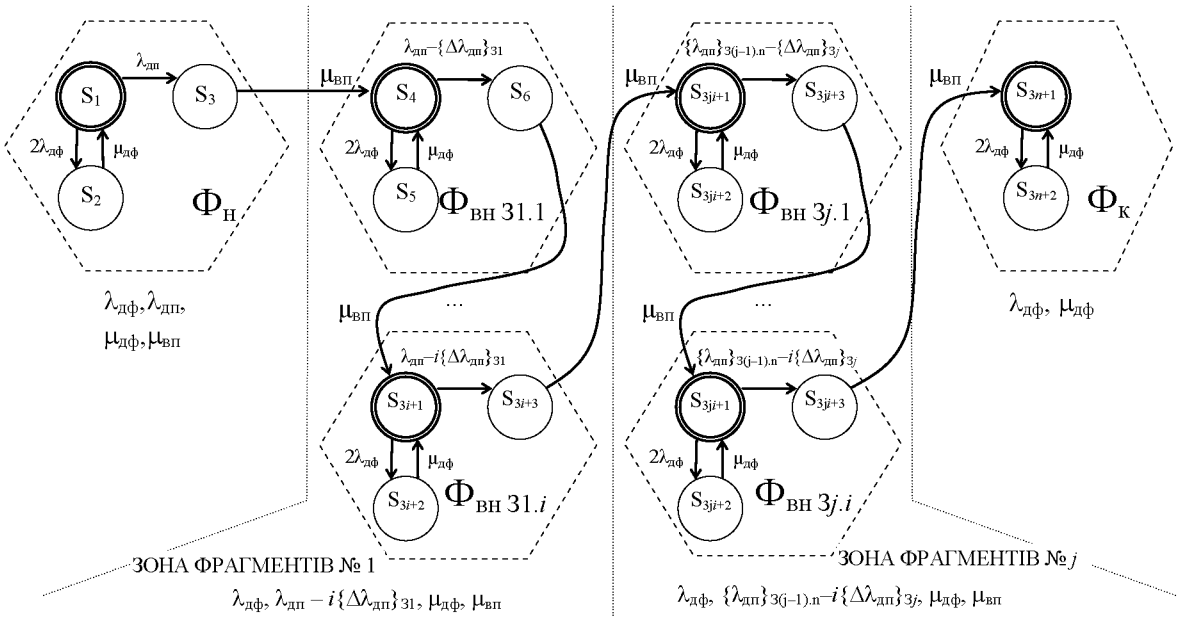


Рисунок 2.4 – Макрограф БММ №2 ($\lambda_{дп}$=var, $\mu_{вп}$=const, $\Delta\lambda_{дп}$=var, $\Delta\mu_{вп}$=0)

У БММ № 2 під зоною фрагментів розуміють підмножину внутрішніх фрагментів моделі, у яких величина зміни інтенсивності прояву $\Delta\lambda_{дп}$ ДП ПЗ не змінюється.

Перехід з одного фрагмента в іншої визначається параметром $\mu_{вп}$. У

загальному випадку: $Ф_н$ відповідають параметри $\lambda_{дф}$, $\lambda_{дп}$, $\mu_{дф}$, $\mu_{вп}$; $Ф_{вн}$ відповідають параметри $\lambda_{дф}$, $\lambda_{дп(i)} = \lambda_{дп\ З(j-1).n} - i \cdot \Delta\lambda_{дп\ Зj}$, $\mu_{дф}$, $\mu_{дп}$; $Ф_т$ відповідають параметри $\lambda_{дф}$, $\mu_{дф}$.

Логіка функціонування полягає в наступному. Момент початку функціонування системи описується вихідним фрагментом. Перехід до внутрішніх фрагментів визначається послідовністю подій, які полягають у прояві ДП ПЗ та відновленні ПЗ після їх прояву. Переходи між зонами внутрішніх фрагментів визначаються параметром $\mu_{вп}$. При цьому $\mu_{вп}$ залишається величиною постійною. В останньому фрагменті всі ДП ПЗ усунені і функціонування системи визначається параметрами $\lambda_{дф}$, $\mu_{дф}$.

У рамках БММ № 4, 5 і 6 представляється можливим проаналізувати вплив на надійність обчислювальної системи зміни параметра $\mu_{вп}$ (інтенсивності відновлення після прояви ДП ПЗ). При цьому в рамках БММ № 4 враховується зміна $\mu_{вп}$ в кожному внутрішньому фрагменті, а БММ № 5 зміна цього параметра при переході від однієї зони фрагментів до іншої.

У рамках БММ № 7 здійснюється облік зміни інтенсивності прояву ДП ПЗ і відновлення після прояву. Даній БММ відповідає наступний варіант комбінації параметрів:

– $\lambda_{дп}$= var → $\Delta\lambda_{дп}$=const (величина постійна в кожному внутрішньому фрагменті);

– $\mu_{вп}$= var → $\Delta\mu_{вп}$=const (величина постійна в кожному внутрішньому фрагменті).

Макрограф БММ № 7 представлений на рис. 2.5.

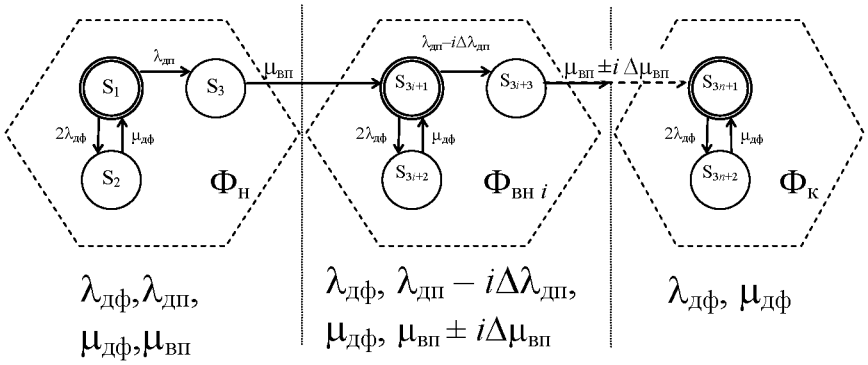


Рисунок 2.5 – Макрограф БММ №7 ($\lambda_{дп}$=var, $\mu_{вп}$=var, $\Delta\lambda_{дп}$=const, $\Delta\mu_{вп}$=const)

У моделі передбачаються два варіанти зміни параметра $\mu_{ВП}$:

– «Оптимістичний», коли середній час висівання ДП після його прояви зменшується і параметр $\mu_{ВП}$ збільшується на $\Delta\mu_{ВП}$ (це може пояснюється підвищенням рівня кваліфікації команди програмістів, що спеціалізується на усунення ДП);

– «Песимістичний», коли середній час висівання ДП збільшується і параметр $\mu_{ВП}$ зменшується на $\Delta\mu_{ВП}$ (цей варіант характерний для випадків, коли поступово виявляються різнорідні ДП, для кожного з яких потрібна розробка окремої процедури усунення). При цьому, виходячи з кінцевого обсягу ПЗ, параметр $\mu_{ВП}$ зменшується до деякої величини $\mu_{ВП\,min}$ яка характеризує найменш сприятливий варіант усунення ДП.

Можливі інші варіанти комбінацій параметрів, що визначають надійність програмної компоненти, що описується базовими багатофрагментними макромоделями БММ № 8 ÷ 13.

У роботі розглядаються тільки процеси усунення ДП ПЗ. Однак, отримані результати можна застосувати і для моделювання процесів внесення нових ДП при виконанні операцій усунення виявлених помилок ПЗ. При цьому інтенсивність відмов ПЗ буде змінюватися на величину $\Delta\lambda_{ДП}$, знак якої (±) буде залежати від різниці кількості усунених і знову внесених ДП.

Висновки до розділу 2

В розділі виконано математичний опис станів відмовостійких комп'ютерних систем. Зроблено висновок, що для адекватного моделювання ВКС при зміні параметрів потоків відмов та відновлення необхідно використовувати вкладені ланцюги маркова (ВЛМ). Для застосування апарату ВЛМ обґрунтовані набір припущень.

З урахуванням введених термінів, обґрунтованих припущень і розглянутих варіантів зміни параметрів потоків відмов та відновлення, сформульовано послідовність дій з формування множини станів ВЛМ, а також групування станів в фрагменти і зони фрагментів.

Розроблено множину однофрагментних і багатофрагментних марковських моделей, що описують процес функціонування відмовостійких комп'ютерних систем з урахуванням одного з варіантів зміни параметрів, що характеризують надійність програмної частини.

Розглянуто тільки процеси усунення ДП ПЗ. Однак, отримані результати можна застосувати і для моделювання процесів внесення нових ДП при виконанні операцій усунення виявлених помилок ПЗ. При цьому інтенсивність відмов ПЗ буде змінюватися на величину $\Delta\lambda_{ДП}$, знак якої (±) буде залежати від різниці кількості усунених і знову внесених ДП.

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБЛЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ

3.1 Розробка обчислювального алгоритму і програмного забезпечення чисельного дослідження вкладених марковських ланцюгів

Проведені дослідження показали необхідність рішення СДР з кількістю невідомих 100-800 членів. Як показали дослідження при вирішенні СДР такої розмірності ефективність аналітичних методів рішення, що базуються на інтегральних перетвореннях Лапласа дуже низька. Висока розмірність задачі обумовлює застосування наступних чисельних методів рішення таких систем рівнянь.

1. Слабкоточні:

а) метод невизначених коефіцієнтів;

б) метод послідовних наближень;

в) метод Ейлера.

2. Методи прогнозу та корекції:

а) метод Ейлера-Коші;

б) методи Рунге-Кутта.

3. Спеціальні методи (диференціювання «назад»):

– метод Адамса;

– метод Куртіса і Хіршфедера;

– метод Пікара;

– метод Гіра;

– експонентний метод.

Жорсткість диференціальних рівнянь накладає додаткові обмеження на вибір певного методу. Так, найбільш поширений у пакетах моделювання метод Рунге-Кутта четвертого порядку по точності рішення і кількості обчислювальних операцій найбільш ефективний для вирішення звичайних СДР. У разі рішення жорстких систем даний метод показав низьку

ефективність у зв'язку з вибором малого кроку інтегрування для забезпечення стійкості рішення. Проведені дослідження показали, що максимальну ефективність за критерієм «точність рішення - стійкість - кількість обчислювальних операцій» показав експонентний метод.

3.2 Розробка обчислювального алгоритму експоненціального методу

Обчислювальний алгоритм наведений на рис. 3.6. На рис. 3.7 показана модифікована підпрограма адаптивного вибору кроку інтегрування. Програмна реалізація наведена у додатку А.

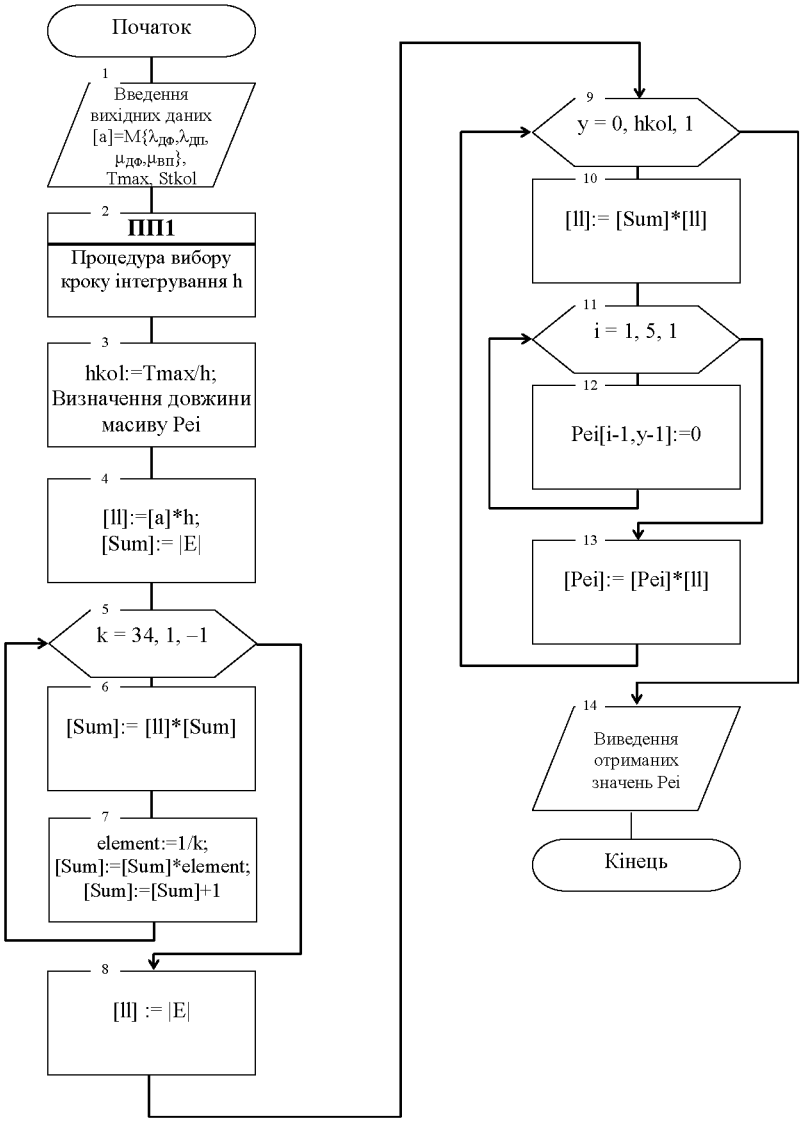


Рисунок 3.6 – Алгоритм експоненціального методу розв'язання жорстких СДР

Для вирішення системи СДР необхідно використовувати наступні вхідні дані:

|A|– матриця коефіцієнтів системи СДР;

t_0 – початковий час, момент часу, коли система була введена в експлуатацію (коли вона вперше почала виконувати свої функції), і коли було розпочато спостереження за функціонуванням ВКС ($t_0 = 0$);

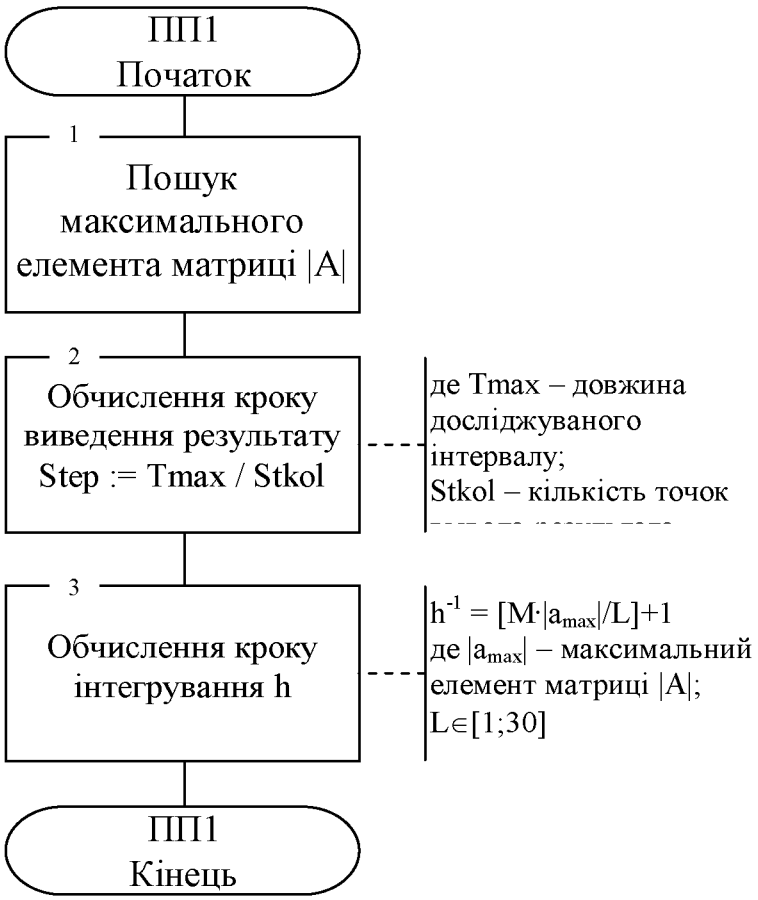


Рисунок 3.7 – Модифікована підпрограма обчислення кроку інтегрування h

tmax – верхня межа тимчасового інтервалу, а при $t_0 = 0$ – ширина тимчасового інтервалу дослідження системи;

Step – величина кроку виведення значень рішень системи СДР (для зменшення кількості числових даних, які будуть отримані при інтегруванні з певним кроком h, користувач отримує вибірку цих даних через крок *Step*);

h – крок інтегрування, в процесі розв'язання системи значення h може змінюватися для забезпечення стійкості рішення системи СДР.

Змінні та масиви даних, які використовуються в програмі вирішення жорсткої системи СДР експоненціальним методом, наступні.

Pei – двовимірний масив, який після виконання програми має вміщувати числові значення ймовірностей станів знаходження системи в певні моменти часу, тобто *Pei* – величина ймовірності знаходження системи в другому стані у момент часу t = t0 + *7h*;

mu1, mu2, la1, la2 – змінні, яким відповідають значення вхідних параметрів системи $\mu_{ДФ}$, $\mu_{ВП}$, $\lambda_{ДФ}$, $\lambda_{ДП}$;

a - матриця, яка вміщує коефіцієнти системи СДР Колмогорова;

hkol – змінна, якій відповідає кількість обчислень, які повинна виконати програма для обчислення всіх значень функцій Pi(t) і $P_Г$(t) на тимчасовому проміжку (0, tmax);

Stkol – змінна, якій відповідає кількість моментів часу, які цікавлять користувача (певні змінної Step)

ll, Sum – двомірні масиви, які застосовуються для зберігання і обробки даних при розкладі в експонентний ряд функцій;

Line – лінійний масив, призначення якого аналогічно призначенням матриць *ll, Sum*;

Element – допоміжна змінна, яка використовується в проміжних розрахунках.

У програмі також використовуються допоміжні змінні *a, j, к, n, i* для організації циклів.

Алгоритм програми можна розбити на наступні умовні блоки:

– Блок введення вихідних даних;

– Блок пошуку максимального за модулем елемента матриці |A|;

– Блок обчислення довжини ділянки інтегрування і кроку виведення результату;

– Блок визначення порядку апроксимації матричної експоненти (що забезпечує необхідну точність обчислень);

– Блок обчислення матричної експоненти згідно співвідношення $e^{Ah} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(hA)^k}{k!}$;

– Блок обчислення результатів диференціювання та їх накопичення.

Склад програмного забезпечення для моделювання і оцінки надійності ВКС включає:

– Expmeth - пакет програм для обчислення значень змінних Pi(t) (ймовірностей знаходження ВКС в і-х станах графа функціонування);

Інтерфейс програми реалізовано на мові C#, а сама розрахункова частина написано на мові TP 7.0, розрахунки на цій мові займають менше машинного часу ніж на C#, але візуалізація та велика кількість інших можливостей не можливі на цій мові. Лістинг програми в додатку до цієї роботи. Користуватися програмою досить легко,запускаємо головний файл програми, потім вказуємо розмірність матриці, і заносимо відповідні коефіцієнти, також можливо завантаження цих даних з текстового файла input.txt, також задаємо відповідні параметри. Перший параметр це час інтегрування, або іншими словами час функціонування системи. Наступний параметр це кількість відрізків інтегрування, тобто кількість частин на яке буде розбитий час інтегрування. І останній параметр це точність результатів, кількість знаків після коми.

Після розв’язання СДУ, програма виводить значення змінних Pi(t) у відповідний момент часу (ймовірностей знаходження ВКС в і-х станах графа функціонування в заданий момент часу).

Користування програми досить просте і зрозуміле. Інтерфейс програми зображений на рис. 3.8:

Знайдені результати програма виводить у нижній частині вікна, а також зберігає в відповідному текстовому файлі output.txt.

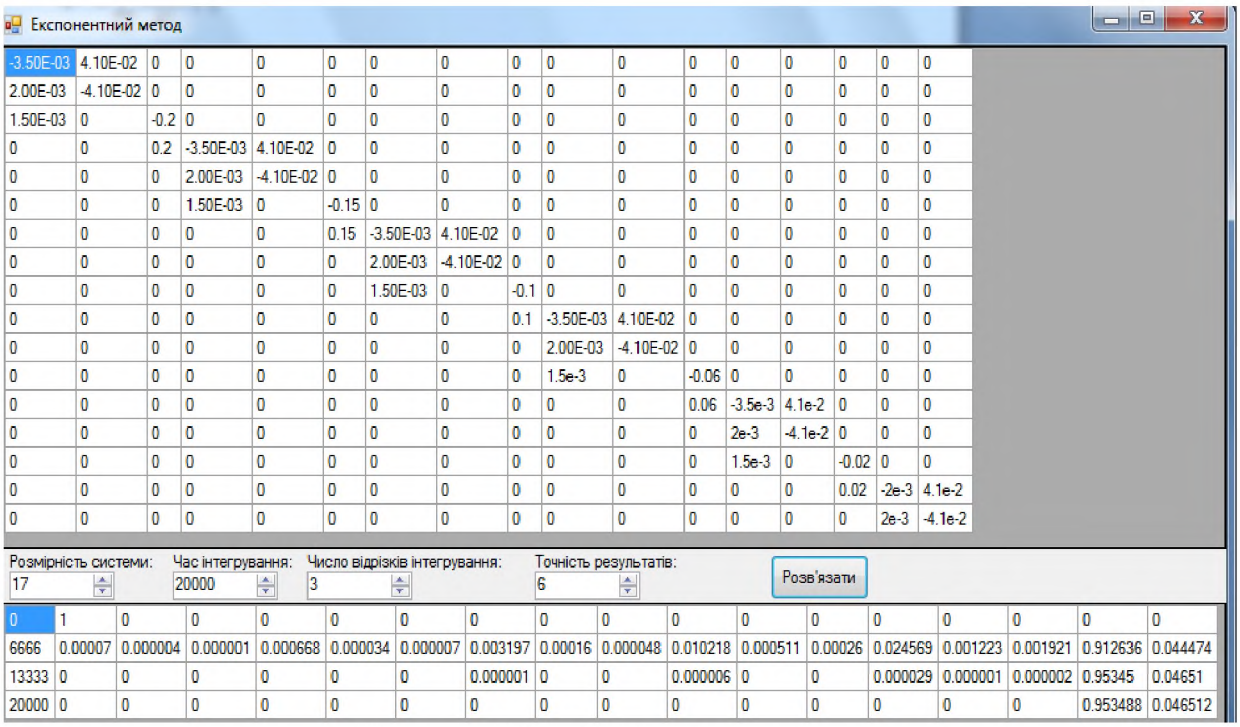


Рисунок 3.8 – Інтерфейс програми

Після кожного запуску програми відбувається оновлення цих файлів, і якщо файл input.txt має якісь вхідні данні. Вони автоматично завантажуються в програму.

3.3. Техніко-економічне обгрунтування розробки програмного продукту

Витрати на розроблення ПЗ здійснюються за формулою:

$$Кп = Кпр + Кпк + Кт \quad (3.1)$$

де *Кпр* – витрати на проєктування ПЗ;

Кпк – витрати на створення компонент ПЗ, з яких складається продукт;

Кт – витрати на тестування та відлагодження ПЗ.

Загальний розрахунок на розробку ПЗ можливо виконати за формулою:

$$Кп = Фз/п\ [(1+βд)(1+βс)+βн+βпр]+t_{ПЕОМ}, \quad (3.2)$$

где *Фз/п* – фонд основної зарабітної платні розробників та інших виконавців;

$\beta д$ – коефіцієнт додаткової заробітної платні, можливо прийняти 0,10...0,15; $\beta с$ – коефіцієнт відрахування, який дорівнює 0,26;

$\beta н$ – коефіцієнт накладних витрат організації 0,6...0,8;

$\beta пр$ – коефіцієнт інших витрат 0,1...0,2;

$t_{ПЕОМ}$ – машинний час, затрачений час на тестування та відлагодження, год.

Відповідно до цього підходу обчислено, що загальний час роботи одного програміста над ПЗ становив 216 годин. За умови оплати праці 20 грн на годину, загальна суму розробки склала 4320 грн.

3.4. Методичні рекомендації щодо використання розробленого програмного забезпечення в навчальному процесі

Мета і завдання роботи:

Метою роботи є вивчення методів моделювання та оцінки показників надійності (готовності) відновлюваних відмовостійких комп'ютерних систем (ВКС) з урахуванням змінних параметрів потоків відмов і відновлення програмних засобів.

Навчальні завдання:

– вивчення методів аналізу базової архітектури ВКС;

– вивчення методів математичного моделювання відновлюваних ВКС з використанням апарату марковських випадкових процесів (вкладених ланцюгів маркова)

Практичні завдання:

– отримання навичок моделювання складних комп'ютерних систем з метою оцінювання показників надійності та визначення їх залежності від параметрів потоків відмов програмних засобів.

Дослідницькі завдання:

– аналіз кількісних результатів моделювання та залежності показників надійності ВКС від параметрів безвідмовності та ремонтопридатності

апаратних і програмних засобів (з урахуванням змінних параметрів потоків відмов і відновлень програмних засобів);

– проведення спрямованого вибору найкращої архітектури відновлюваної ВКС при заданому наборі параметрів і варіанті їх зміни.

Підготовка до лабораторної роботи

При підготовці до лабораторної роботи необхідно:

– ознайомиться з цілями і завданнями дослідження;

– вивчити теоретичний матеріал, наведений в описі, а також у лекційному курсі.

Об'єктом моделювання і дослідження є типові архітектури ВКС, які відрізняються видом і кратністю резервування, наявністю засобів контролю. Ці архітектури і порядок моделювання описані в лекційній частині курсу. Нижче подано коротку інформація по об'єктах моделювання.

1. Типові архітектури, структурні схеми надійності та однофрагментні розмічені графи

У роботі використовується наступне позначення архітектури ВКС:

$S^{к}_{22}$

- S (структура),
- ^{к} (з вбудованими засобами контролю),
- $_{2}$ (кількість каналів АЗ),
- $_{2}$ (кількість версій ПЗ).

Таким чином, розглядаються такі архітектури ОКМ:

– S_{21} – двоканальна, одноверсіонна, без вбудованих засобів контролю;

– S_{22} – двоканальна, двухверсіонна, без вбудованих засобів контролю;

– $S^{к}_{21}$ – двоканальна, одноверсіонна, з вбудованими засобами контролю;

– $S^{к}_{22}$ – двоканальна, двухверсіонна, з вбудованими засобами контролю.

ССН ВКС S_{21} і граф її ОФМ представлені на рис. 2.1. ССН інших структур і графи їх ОФМ представлені на рис. 4.1. При зображенні станів на графах ОФМ фігурами з подвійною лінією позначені працездатні стану ВКС,

а фігурами з суцільною лінією - непрацездатні стану. Як видно з рис. 3.9, наявність вбудованих засобів контролю дозволяє виявити поодинокі відмови каналу АЗ або версії ПЗ, що розширює множину можливих станів моделі маркова.

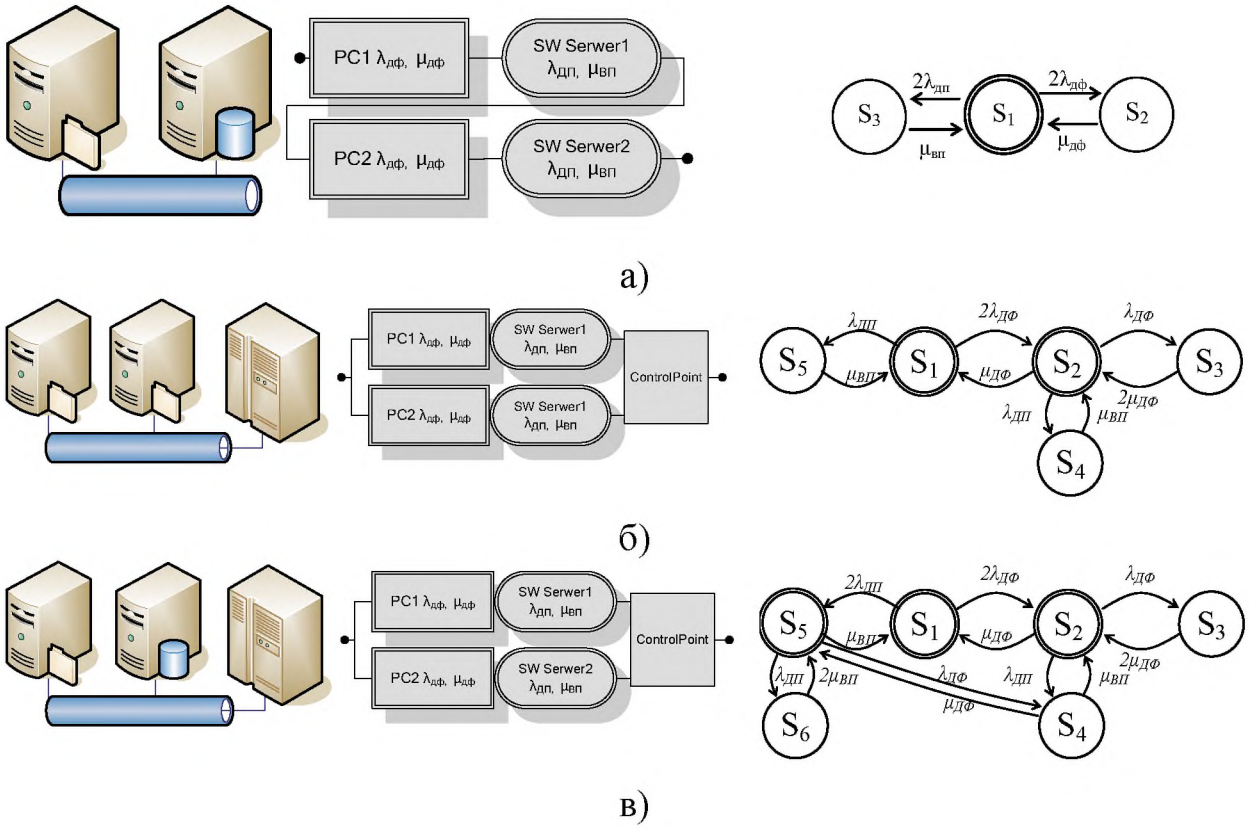


Рисунок 3.9 – ССН і графи ОФМ
типових архітектур ОКС: а) S_{22}, б) $S^{к}_{21}$, в) $S^{к}_{22}$

2. Базові багатофрагментні макромоделі

При розробці моделей прийнята наступна система позначень використовуваних параметрів:

$\lambda_{дп}$ – інтенсивність прояву ДП ПЗ;

$\mu_{вп}$ – інтенсивність відновлення після прояву ДП ПЗ.

Параметри, що враховують зміна надійності ПЗ у часі:

$\Delta\lambda_{дп}$ – величина зміни параметра $\lambda_{дп}$;

$\Delta_{дп}$ – величина зміни параметра $\Delta\lambda_{дп}$ (при переході БФМ з одного фрагмента (зони фрагментів) в інший (іншу) зону;

$\Delta\mu_{вп}$ – величина зміни параметра $\mu_{вп}$;

$\Delta_{вп}$ – величина зміни параметра $\Delta\mu_{вп}$ (при переході БФМ з одного фрагмента (зони фрагментів) в інший (іншу) зону.

Для визначення комбінацій варіантів зміни параметрів потоків відмов та відновлення необхідно перебрати випадки λ = const, λ = var, μ = const, μ = var, $\Delta\lambda = 0$, $\Delta\lambda$ = const, $\Delta\lambda$ = var, $\Delta\mu = 0$, $\Delta\mu$ = const, $\Delta\mu$ = var.

Для цього запишемо перелік базових макромоделей для різних видів зміни параметрів потоків. Перша цифра числової послідовності визначає основні параметри $\lambda_{дп}$, $\mu_{вп}$. Друга - визначає номер варіанту характеру зміни параметрів $\lambda_{дп}$, $\mu_{вп}$. Третя - визначає номер варіанти зміни величин $\Delta\lambda_{дп}$ і $\Delta\mu_{вп}$. Четверта - визначає номер варіанта зміни величин $\Delta\lambda_{дп}$ і $\Delta\mu_{вп}$. Повна числова послідовність визначає основний зміст базової макромоделі. Таким чином, отримані наступні варіанти зміни параметрів, що визначають характеристики надійності ПЗ ВКС:

БММ №1 (1.2.1.1) – $\Delta\lambda_{дп}$ – величина постійна в кожному фрагменті, $\Delta\lambda_{дп\,i}$ = const, $i \in 1\ldots N$, де N – число фрагментів.

БММ №2 (1.2.1.2 и 1.2.2.1) – $\Delta\lambda_{дп}$ – величина постійна в зоні фрагментів, $\Delta\lambda_{дп\,i} \in \{\Delta\lambda_{дп\,0}, \ldots, \Delta\lambda_{дп\,Nz}\}$, де Nz – число зон фрагментів.

БММ №3 (1.2.2.2) – $\Delta\lambda_{дп}$ – величина, що змінюється в кожному фрагменті, $\Delta\lambda_{дп} \in \{\Delta\lambda_{дп\,i}, \ldots, \Delta\lambda_{дп\,N}\}$, де N - число фрагментів.

БММ №4 (1.3.1.1) – $\Delta\mu_{вп}$ – величина постійна в кожному фрагменті $\Delta\mu_{вп\,i}$ = const, $i \in 1\ldots N$, де N – число фрагментів.

БММ №5 (1.3.1.2 и 1.3.2.1) $\Delta\mu_{вп}$ – величина постійна в зоні фрагментів, $\Delta\mu_{вп\,i} \in \{\Delta\mu_{вп\,0}, \ldots, \Delta\mu_{вп\,Nz}\}$, де Nz – число зон фрагментів.

БММ №6 (1.3.2.2) – $\Delta\mu_{вп}$ – величина, що змінюється в кожному фрагменті, $\Delta\mu_{вп} \in \{\Delta\mu_{вп\,i}, \ldots, \Delta\mu_{вп\,N}\}$, де N – число фрагментів.

БММ №7 (1.4.1.1) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{дп}$ і $\mu_{вп}$. Величини $\Delta\lambda_{дп}$ та $\Delta\mu_{вп}$ постійні у кожному фрагменті, де $\Delta\lambda_{дп\,i}$ = const, $\Delta\mu_{вп\,i}$ = const, $i \in 1\ldots N$, де N – число фрагментів

БММ №8 (1.4.2.1) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{дп}$ і $\mu_{вп}$.

Величина $\Delta\lambda_{ДП}$ постійна в кожному фрагменті, $\Delta\lambda_{ДП\,i} = const$. Величина $\Delta\mu_{ВП}$ постійна в зоні фрагментів, $\Delta\mu_{ВП\,i} \in \{\Delta\mu_{ВП\,0}, \ldots, \Delta\mu_{ВП\,Nz}\}$, де Nz – число зон фрагментів.

БММ №9 (1.4.2.2) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{ДП}$ і $\mu_{ВП}$. Величина $\Delta\lambda_{ДП}$ постійна в кожному фрагменті, $\Delta\lambda_{ДП\,i} = const$. Величина $\Delta\mu_{ВП}$ змінюється в кожному фрагменті, $\Delta\mu_{ВП} \in \{\Delta\mu_{ВП\,i}, \ldots, \Delta\mu_{ВП\,N}\}$, де N – число фрагментів.

БММ №10 (1.4.3.1) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{ДП}$ і $\mu_{ВП}$. Величина $\Delta\mu_{ВП}$ постійна в кожному фрагменті, $\Delta\mu_{ВП\,i} = const$. Величина $\Delta\lambda_{ДП}$ постійна в зоні фрагментів, $\Delta\lambda_{ДП\,i} \in \{\Delta\lambda_{ДП\,0}, \ldots, \Delta\lambda_{ДП\,Nz}\}$, де Nz – число зон фрагментів.

БММ №11 (1.4.3.2) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{ДП}$ і $\mu_{ВП}$. Величина $\Delta\mu_{ВП}$ постійна в кожному фрагменті, $\Delta\mu_{ВП\,i} = const$. Величина $\Delta\lambda_{ДП}$ змінюється в кожному фрагменті, $\Delta\lambda_{ДП} \in \{\Delta\lambda_{ДП\,i}, \ldots, \Delta\lambda_{ДП\,N}\}$, где N – число фрагментів.

БММ №12 (1.4.4.1) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{ДП}$ і $\mu_{ВП}$. Величини $\Delta\mu_{ВП}$ та $\Delta\lambda_{ДП}$ змінюються в кожному фрагменті.

БММ №13 (1.4.4.2) – в моделі враховується зміна величин $\lambda_{ДП}$ і $\mu_{ВП}$. Величини $\Delta\mu_{ВП}$ та $\Delta\lambda_{ДП}$ змінюються в зоні фрагментів.

Моделювання процесу функціонування обчислювальної системи в рамках параметрів БММ № 1,2,4,5,7 досить легко реалізується за допомогою математичного апарату марковських випадкових процесів з безперервним часом і дискретними станами. Внаслідок урахування зміни параметрів $\lambda_{ДП}$ і $\mu_{В}$ на величини $\Delta\lambda_{ДП}$ і $\Delta\mu_{ВП}$ розмірність задачі значно зростає, тому ефективність моделювання ВЛМ падає, що призводить до необхідності застосування спеціальних методів, наприклад імітаційного моделювання.

Досліджуються багатофрагментні моделі типових архітектур ВКС. Досліджуємо першу архітектуру S_{21}.

Система має два апаратних канали. Програмні засоби, що використовуються каналами однакові. Засоби реконфігурації після відмови

одного з каналів внаслідок ДФ відсутні. ССН і розмічений граф функціонування представлені на рис. 3.10. Граф описує три стани:

S_1 – стан, у якому система працездатна;

S_2 – стан, який характеризується відмовою одного з каналів по апаратної компоненті (прояв фізичного дефекту);

S_3 – стан відмови системи з програмної компоненті (прояв ДП ПЗ).

На основі БММ 1 і однофрагментної моделі (рис. 2.2) отримаємо багатофрагментний граф маркова функціонування системи S_{21}

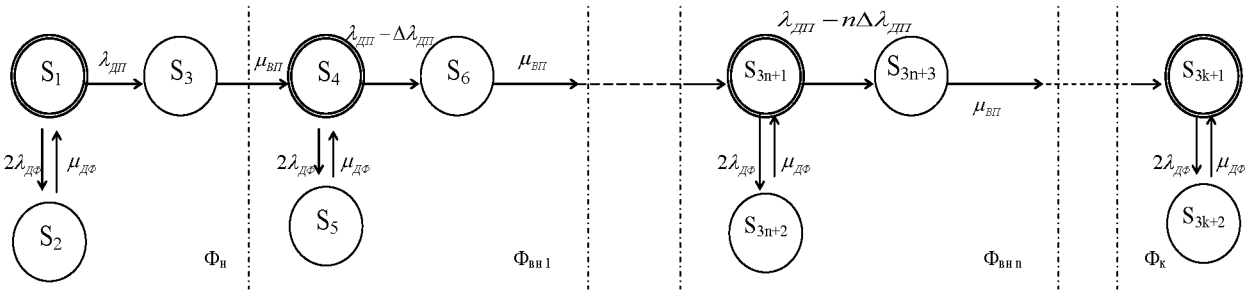


Рисунок 3.10 – Розмічений граф (ВЛМ) функціонування ВКС S_{21}

ВЛМ містить наступні стани:

$SF_1=\{S_1,S_4,\ldots,S_{3n+1}\}$ – множина станів, в яких система працездатна. Вихідні стани для всіх видів фрагментів (початкового, внутрішніх і кінцевого);

$SF_2=\{S_2,S_5,\ldots,S_{3n+2}\}$ – множина станів, у яких сталася відмова одного з каналів АЗ;

$SF_3=\{S_3,S_6,\ldots,S_{3n+3}\}$ – множина станів, у яких сталася відмова ПЗ.

СДР Колмогорова, побудована на основі графа (рис. 3.2) має наступний вигляд:

для початкового фрагмента $Ф_н$

$$dP_1/dt = -(2\lambda_{ДФ} + \lambda_{ДП})P_1(t) + \mu_{ДФ}P_2(t),$$
$$dP_2/dt = -\mu_{ДФ}P_2(t) + 2\lambda_{ДФ}P_1(t),$$
$$dP_3/dt = -\mu_{ВП}P_3(t) + \lambda_{ДП}P_1(t);$$

для внутрішніх фрагментів $Ф_{вн\,i}$

$$dP_{3i+1}/dt = -\left(\lambda_{ДП} - i\Delta\lambda_{ДП} + 2\lambda_{ДФ}\right)P_{3i+1}(t) + \mu_{ВП}P_{3i}(t) + \mu_{ДФ}P_{3i+2}(t),$$
$$dP_{3i+2}/dt = -\mu_{ДФ}P_{3i+2}(t) + 2\lambda_{ДФ}P_{3i+1}(t),$$
$$dP_{3i+3}/dt = -\mu_{ВП}P_{3i+3}(t) + \left(\lambda_{ДП} - i\Delta\lambda_{ДП}\right)P_{3i+1}(t);$$

для кінцевого фрагмента $Ф_к$

$$dP_{3k+1}/dt = -2\lambda_{ДФ}P_{3k+1}(t) + \mu_{ВП}P_{3k}(t) + \mu_{ДФ}P_{3k+2}(t),$$
$$dP_{3k+2}/dt = -\mu_{ДФ}P_{3k+2}(t) + 2\lambda_{ДФ}P_{3k+1}(t);$$

початкові умови

$$t = 0,\ P_1(0) = 1,\ P_i(0) = 0,\ i = 2,\ldots,3k+2.$$

Функція готовності визначається як сума вірогідності знаходження системи в працездатному стані $SF_1=\{S_1,S_4,\ldots,S_{3n+1}\}$.

$$P_Г(t) = \sum_{i=0}^{k} P_{3i+1}(t).$$

Функція оперативної готовності визначається як

$$P_{ОГ}(t,\tau) = \sum_{i=0}^{k}\left[P_{3i+1}(t)P_{БР\,3i+1}(\tau)\right].$$

Завдання лабораторної роботи:

Вивчити теоретичний матеріал, який стосується багатофрагментного моделювання ВКС.

На основі ССН і однофрагментного графа розробити багатофрагментну модель функціонування кожної ВКС у відповідність з варіантами завдань.

Отримати систему диференціальних рівнянь Колмогорова.

За допомогою програми отримати рішення СДР (ймовірність знаходження системи в кожному станів).

Отримати значення шуканих коефіцієнтів - функцій готовності та оперативної готовності.

Побудувати графіки отриманих функцій.

Сформулювати висновки і оформити звіт.

Таблиця 3.3 – Варіанти завдань:

№ зав-дання	Тип архі-тектури	БММ										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	S_{21}	+		+								
2	S_{21}		+		+							
3	S_{21}						+	+				
4	S_{21}										+	+
5	S_{22}		+		+					+		+
6	S_{22}		+		+					+		+
7	S_{22}										+	
8	S_{22}	+		+								
9	$S^{к}_{21}$		+		+							
10	$S^{к}_{21}$						+	+				
11	$S^{к}_{21}$										+	+
12	$S^{к}_{22}$											
13	$S^{к}_{22}$											
14	$S^{к}_{22}$										+	
15	$S^{к}_{22}$		+		+							

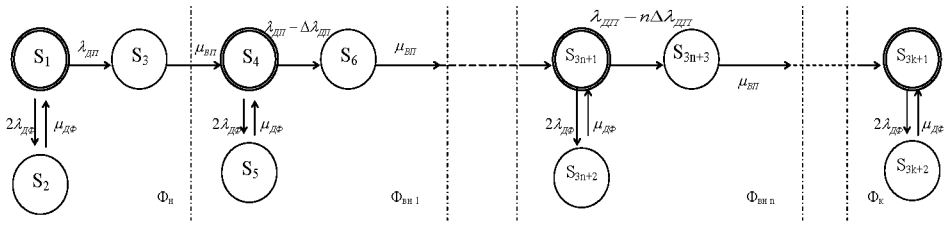
Кількісні значення параметрів потоків відмов і відновлень апаратних і програмних засобів приймаються для всіх варіантів у відповідність табл. 4.4. Для всіх варіантів завдань число залишкових дефектів прийняти рівним 5. Загальна тривалість досліджуваного інтервалу часу - T = 20000.

Таблиця 3.4 – Значення параметрів ВКС

$\lambda_{дф}$ (1/ч)	$\mu_{дф}$ (1/ч)	$\lambda_{дп}$ (1/ч)	$\mu_{вп}$ (1/ч)	$\Delta\mu_{вп}$ (1/ч)	$\Delta\lambda_{дп}$ (1/ч)	$\Delta_{дп}$ (1/ч)	$\Delta_{вп}$ (1/ч)
10^{-3}	$4{,}1\cdot10^{-2}$	$1{,}5\cdot10^{-3}$	0,2	$5\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-4}$	10^{-5}	10^{-4}

Приклад виконання лабораторної роботи.

Завдання: дано архітектуру $S_{21,}$ та тип розподілу ймовірностей за БММ №1. Спочатку будуємо багатофрагментну модель маркова для заданої архітектури. Розмічений граф цієї моделі матиме наступний вигляд:



Розмічений граф (ВЛМ) функціонування ВКС S_{21} побудований у відповідності з БММ 1

Будуємо систему диференціальних рівнянь для даної системи, кількість рівнянь залежить від кількості дефектів програмних засобів, в цьому прикладі кількість дефектів рівна 5, і система складається з 17ти рівнянь:

$$dP_1/dt = -(2\lambda_{ДФ} + \lambda_{ДП})P_1(t) + \mu_{ДФ}P_2(t),$$
$$dP_2/dt = -\mu_{ДФ}P_2(t) + 2\lambda_{ДФ}P_1(t),$$
$$dP_3/dt = -\mu_{ВП}P_3(t) + \lambda_{ДП}P_1(t);$$

для внутрішніх фрагментів $Ф_{ВН\ i}$

$$dP_{3i+1}/dt = -\left(\lambda_{ДП} - i\Delta\lambda_{ДП} + 2\lambda_{ДФ}\right)P_{3i+1}(t) + \mu_{ВП}P_{3i}(t) + \mu_{ДФ}P_{3i+2}(t),$$
$$dP_{3i+2}/dt = -\mu_{ДФ}P_{3i+2}(t) + 2\lambda_{ДФ}P_{3i+1}(t),$$
$$dP_{3i+3}/dt = -\mu_{ВП}P_{3i+3}(t) + \left(\lambda_{ДП} - i\Delta\lambda_{ДП}\right)P_{3i+1}(t);$$

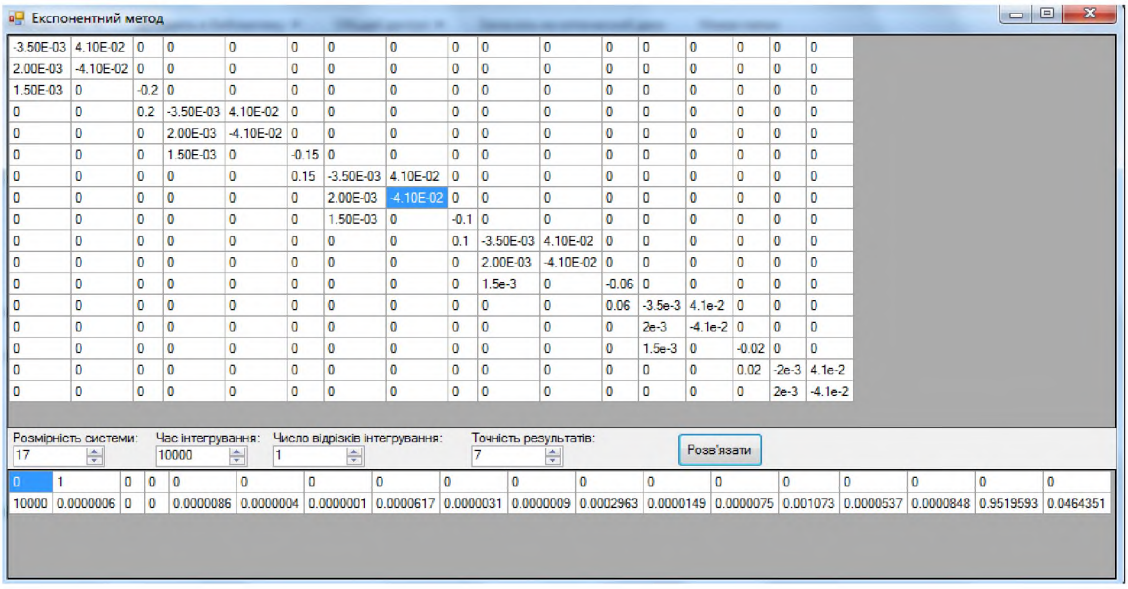
для кінцевого фрагмента $Ф_К$

$$dP_{3k+1}/dt = -2\lambda_{ДФ}P_{3k+1}(t) + \mu_{ВП}P_{3k}(t) + \mu_{ДФ}P_{3k+2}(t),$$
$$dP_{3k+2}/dt = -\mu_{ДФ}P_{3k+2}(t) + 2\lambda_{ДФ}P_{3k+1}(t);$$

початкові умови:

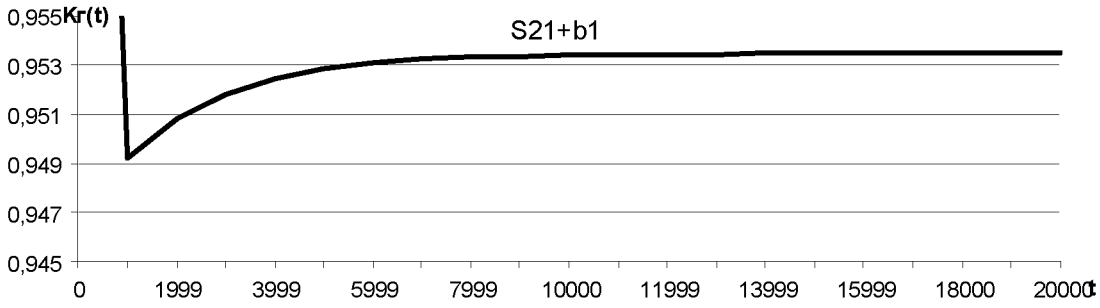
$$t = 0,\ P_1(0) = 1,\ P_i(0) = 0,\ i = 2,\ldots,3k+2.$$

Замість відповідних коефіцієнтів в рівняння підставляємо подані в завданні показники і записуємо матрицю коефіцієнтів отриманих на основі СДУ. Потім заносимо цю матрицю до програми рішення рівнянь:



Задаємо точність результатів для наглядності 7 знаків після коми, час інтегрування 10000 годин.

Знаходимо значення залежності відповідних коефіцієнтів від часу і будуємо графік:



Висновки до розділу 3

Розроблено обчислювальний алгоритм чисельного експоненційного методу рішення систем диференційних рівнянь Колмогорова-Чепмена. Здійснено його модифікацію з урахуванням адаптивного шагу інтегрування.

Розроблено програмне забезпечення на мові C#, а сама розрахункова частина написано на мові TP 7.0, розрахунки на цій мові займають менше машинного часу ніж на C#, але візуалізація та велика кількість інших можливостей не можливі на цій мові. Інтерфейс досить простий, що спрощує користування програмою. Виконується запуск запускаємо головниго файлу програми, потім вказується розмірність матриці, і заносимо відповідні коефіцієнти, також можливо завантаження цих даних з текстового файла input.txt, також задаємо відповідні параметри. Перший параметр це час інтегрування, або іншими словами час функціонування системи. Наступний параметр це кількість відрізків інтегрування, тобто кількість частин на яке буде розбитий час інтегрування. І останній параметр це точність результатів, кількість знаків після коми. Після розв'язання СДУ, програма виводить значення змінних Pi(t) у відповідний момент часу (ймовірностей знаходження ВКС в i-х станах графа функціонування в заданий момент часу).

Розроблено методичні рекомендації щодо застосування розробленого програмного забезпечення в навчальному процесі. Дану методичну розробку можливо використовувати в рамках пропонуємої вибіркової навчальної дисципліни «Системи і технології високої готовності».

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу моделювання та оцінювання надійності ВКС та їх елементів визначений об'єкт досліджень – процеси моделювання та оцінювання надійності ВКС.

2. Проведено аналіз конфігурацій ВКС за рядом ознак, що враховують різні види надлишковості (апаратну, інформаційну), що використовуються при реалізації систем заданого класу, можливість використання в них засобів вбудованого контролю і різні (з точки зору тривалості) режими активного функціонування.

3. Проведена систематизація моделей і методів оцінювання надійності ПЗ дозволяє сформулювати висновок про те, що для оцінки надійності (безвідмовності, відновлюючи) ПЗ на основі експонентних імовірнісних моделей можуть використовуватися показники, аналогічні показниками надійності (безвідмовності) АЗ.

4. В першому розділі показано роль моделювання на етапах проєктування і експлуатації ВКС. Проаналізовано вимоги і обґрунтований комплексний показник надійності ВКС; виділені різні варіанти функціонування ВКС при усуненні дефектів ПЗ. Розглянуто стандартні методи моделювання при аналізі надійності ВКС та виділено метод марківського аналізу, що дозволяє оцінити комплексний показник надійності систем зі складною апаратної та логічною структурою. Виділено проблеми застосування марковських моделей у разі зміни параметрів прояву дефектів системи.

5. У другому розділі розглянуто метод математичного опису станів ВКС, заснований на представленні їх моделей у вигляді повторюваних фрагментів, на відміну від існуючих враховується дискретна зміна одного або декількох параметрів, що дозволяє знизити на 5-15% витрати на розробку базових моделей за рахунок їх регуляризації і спрямованого вибору в залежності від варіантів зміни параметрів потоків відмов та відновлення.

6. На основі повного перебору комбінацій варіантів змін інтенсивності відмов та відновлення виділено множину базових макромоделей, що дозволяють формувати багатофрагментні і багатозонові ВЛМ. Число базових макромоделей визначається числом варіантів лінерізації зміни інтенсивності відмов та відновлення.

7. Для типових варіантів надійної структури ВКС побудовані макрографи ВЛМ. Для дубльованої одноверсійної архітектури ВКС такі графи є регулярними і складаються з регулярних фрагментів (БММ 1 і 7), або містять регулярні зони фрагментів (БММ 2). Для кожного макрографа описана логіка функціонування ВКС.

8. З отриманих даних можна зробити висновок, що система набуває стабільності в роботі після 8000 годин напрацювання, і більша частина дефектів усунена. Результати моделювання одноверсіонної архітектури ВКС побудованої на основі БММ показали, що в процесі усунення ДП ПЗ надійність систем асимптотично прямує до прямої Кг = 0,954, яка характеризує усталений режим надійності АС двоканальної системи. Та сама нестабільна робота системи припадає на перші 2000 годин роботи, через це потрібно приділити найбільшу увагу до роботи системи саме на цьому проміжку роботи.