

**Міністерство освіти і науки України**  
**Харківський національний університет радіоелектроніки**

**РАЗІ ДЖАБУР ШГІТ АЛЬ-АЗАВІ**

УДК 519.21

**МАРКІВСЬКІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ЛІКВІДАЦІЇ АВАРІЙ  
В ЛЮДИНО- МАШИННИХ СИСТЕМАХ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
Наумейко Ігор Володимирович,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Комяк Валентина Михайлівна,  
професор кафедри фізико-математичних дисциплін  
Національного університету цивільного захисту  
України;

доктор технічних наук, професор  
Самойленко Микола Іванович,  
завідувач кафедри прикладної математики та  
інформаційних технологій Харківського  
національного університету міського  
господарства.

Захист відбудеться "27" січня 2015 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.В. Безкоровайний

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** За останні 10 років системи "людина-машина-середовище" (Л-М-С) виділилися в особливий клас людино-машинних систем (ЛМС), що включає деякі важливі системи економіки, екології, військової справи та безпечної життєдіяльності. Ці елементи завжди входили в більшість кібернетичних систем, але розглядалися тільки з погляду автоматизованого управління, із застосуванням обмеженого кола методів дослідження, наприклад, систем масового обслуговування (СМО) і теорії надійності. Сьогодні найбільш актуальними із Л-М-С є системи із захистом. Вони складають окремий клас систем з марківською властивістю, але не можуть бути повністю описані за допомогою методів СМО (за відсутності такого поняття як «черга») або теорії надійності (тут відсутній сенс у таких поняттях, як «резерв» тощо). Терміном «захист» тут позначаються всі види технічних засобів (статичні та динамічні), а також заходи та процеси відновлення працездатності системи Л-М-С.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-технічних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки, та за наказом Міносвіти і науки України № 1177 від 30.11.10 р., у рамках держбюджетної теми №254 «Розробка моделей, методів та інструментальних засобів структурно топологічної і параметричної оптимізації територіально розподілених систем». Дисертаційна робота є складовою частиною проведених за цією темою досліджень. В якості застосування моделей і методів проведений аналіз і розрахунок процесів ліквідації аварій на системах енергопостачання в місті Харкові.

**Мета і завдання дослідження** полягає в обчисленні ймовірностей станів і вартісних характеристик системи Л-М-С із захисною підсистемою для підвищення ефективності її роботи в аварійних ситуаціях. Досягнення цієї мети вимагає вирішення таких завдань:

- системний аналіз ЛМС і її реакції на аварійні ситуації;
- побудова загальної та низки часткових моделей ЛМС для різних типів її структур;
- дослідження стійких стаціонарних рішень динаміки систем із захистом, а також перехідних процесів у них;
- проведення обчислювальних експериментів для отримання ймовірностей станів у Л-М-С системах різної структури.

**Об'єкт дослідження.** Процес динаміки системи типу Л-М-С при зовнішньому потоці природних або техногенних аварій.

**Предмет дослідження.** Функціонування систем Л-М-С із захисною підсистемою при, як дискретно, так і безперервному випадковому часі зміни її дискретних станів у процесі ліквідації аварій та відновлення працездатності.

**Методи дослідження.** В ході вирішення поставлених завдань було застосовано теорію марківських ланцюгів з дискретним простором станів і безперервним часом, розв'язання систем диференціальних рівнянь Колмогорова

і алгебраїчних систем для граничних ймовірностей, а також чисельний аналіз там, де аналітичне розв'язання неможливо, або недоцільно.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Під час розв'язання поставлених задач автором розроблено та досліджено математичні моделі відновлюваного об'єкта з урахуванням ймовірностей переходів між станами та зміни працездатності людини-оператора в системі "Л-М-С". Для розроблених моделей були отримані ймовірності станів системи.

В роботі:

– вперше запропоновано марківські моделі для різних систем Л-М-С:

1) модель з дискретним часом процесу ліквідації аварій в замкнутій стаціонарній системі Л-М-С;

2) динамічні моделі систем Л-М-С (спрощена, а також з урахуванням стану працездатності людини);

3) моделі на випадок мультикатастроф у системах Л-М-С;

4) узагальнення моделей 2) на випадок нестационарного потоку аварій, що разом дозволило оцінити середні значення вартості відновлювальних заходів і втрати від аварій;

– вперше застосований метод «максимуму інформаційної ентропії» для визначення параметрів здоров'я і працездатності оператора за спостережуваними макрохарактеристиками. У роботі метод набув подальшого розвитку в частині використання обмежень, відмінних від математичного очікування;

– вдосконалено методи моделювання, розроблені раніше для СМО, в частині визначення перехідних ймовірностей між станами підсистем "Машина" та "Людина" з метою дослідження нового класу систем з динамічним багатостадійним відновленням;

– удосконалено метод середніх оцінок стосовно щільностей подій, що дозволило застосувати формули, отримані для стаціонарного випадку до нестационарного потоку аварій в системах Л-М-С.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що розроблені методи можуть бути використані в ході оцінювання тривалості відновлювальних робіт і фізичного стану ліквідаторів, для чого:

– отримано розрахункові формули для моделей систем Л-М-С при стаціонарному потоці аварій та катастроф, що дозволяють оцінити ймовірності безаварійної роботи, відновлення після аварії і середню вартість відновлення працездатності системи;

– в результаті обчислювальних експериментів отримано залежності ймовірностей станів системи та оператора в ході ліквідації аварій у системі Л-М-С з нестационарним потоком подій. Це дає можливість визначити час встановлення процесу та скоротити час перебування системи в несприятливих станах;

– розширено область застосування методів на практично важливий клас систем з мультикатастрофами.

Корисність розробленої автором методики підрахунку ймовірностей станів системи підтверджується актом про впровадження у НПП «Електропром», який наведено у додатку Б дисертаційної роботи.

**Особистий внесок здобувача.** Всі положення, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Матеріали, які складають основу дисертаційної роботи, опубліковані в роботах [ 1, 5, 6, 8], виконаних одноосібно, а також у роботах [2, 3, 4, 7 ], виконаних у співавторстві з науковим керівником. У роботах [1 - 8] здобувач брав безпосередню участь у розробці моделей і методів. Так в роботах [1, 2, 5 ] здобувачем запропоновані динамічні моделі систем Л-М-С ( спрощена, а також з урахуванням стану працездатності людини ) . У роботах [ 3 , 7, 8 ] здобувачем удосконалено метод середніх оцінок для ймовірностей станів в системах Л-М-С . У роботах [ 8, 9, 10 ] для визначення параметрів здоров'я і працездатності оператора по спостережуваних макро-характеристикам здобувачем вперше в системах Л-М-С використаний метод «максимуму інформаційної ентропії».

**Апробація результатів дисертації.** Наукові результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри Прикладної математики ХНУРЕ, а також на семи міжнародних конференціях. Усі виступи за темою дисертації.

**Публікації.** Основні положення дисертації відображені у восьми статтях, опублікованих у спеціалізованих фахових виданнях, включених до переліку МОН України, або у міжнародних виданнях, які реферуються, і включені до іноземних та міжнародних наукометричних баз, а також у семи тезах доповідей на міжнародних форумах [9 – 15].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. Загальний обсяг роботи складає 159 сторінку, в тому числі 140 сторінки основного тексту. Дисертація містить 75 ілюстрацій, перелік використаних джерел, що містить 103 найменування на 11 сторінках, 2 додатки на семи сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, формулюються мета та завдання дослідження, стисло викладено зміст дисертації та її основні результати, виділено їх новизну і практичну цінність.

**У першому розділі** описано основні фізичні принципи та математичні моделі для задач і об'єктів – підсистем «людини», «машини» і «навколишнього середовища». Такі системи, де людина є оператором і об'єктом, а шкідливі фактори виробляються пристроєм на додаток до зовнішнього середовища, які впливають на виробництво і оператора, є «ергатичними». Стисло проаналізовано найбільш важливі теоретичні та практичні публікації на цю тему. Виділено недоліки математичних моделей, які використовуються

сьогодні. Проведено системний аналіз проблеми підвищення ефективності ЛМС з марківською властивістю і постановка задачі дослідження.

Л-М-С включають, серед інших, такі дві підсистеми, як «людина» і «навколишнє середовище», які мають випадкову природу. Це означає, що випадкові явища, прийняті до уваги, описують деякі стаціонарні, але не обов'язкові вимоги до системи.

Процес «захисту» відбувається в  $n$  етапів (станів  $S_i$ ), згідно з технологічним процесом підсистеми «машина» і посадових інструкцій людини-оператора. Перехід від стану до стану – не детермінований в часі і визначається заздалегідь визначеними ймовірностями переходу  $p_{ij}$ , або інтенсивностями процесів відновлення. Запропоновані моделі та методи працюють для довільного  $n$ , однак, не порушуючи спільності, вважатимемо, що процес відновлення – повернення в стан  $S_0$  – проходить за три етапи:

- евакуація постраждалих і надання першої допомоги;
- ліквідація джерел аварійного фактора, наприклад, гасіння пожежі;
- відновлення працездатності системи в аварійному режимі. Технічне значення кожного з заходів залежить від конкретного об'єкта. Він не впливає на структуру моделі, і тому, в даній роботі розглядався лише як ілюстрація прикладів.

У результаті системного аналізу в рамках загальної проблеми поставлено для дослідження такі задачі:

- побудувати моделі систем Л-М-С для різного характеру функціонування об'єктів;
- знайти ймовірності станів ЛМС.
- за їхньою допомогою знайти оцінки вартості та ефективності ЛМС.

Відповідно до характеру функціонування, системи Л-М-С розділені на класи, для яких побудовані описані нижче часткові моделі.

Марківські випадкові процеси названі в честь імені видатного російського математика А.А.Маркова, що вперше почав вивчення ймовірнісного зв'язку випадкових величин і створив теорію, яку можна назвати «динамікою ймовірностей». Надалі основи цієї теорії стали вихідною базою загальної теорії випадкових процесів, а також таких важливих прикладних наук, як теорія дифузійних процесів, теорія надійності, теорія масового обслуговування і т.д.

Незважаючи на простоту і наочність, практичне застосування теорії марківських ланцюгів вимагає застосування деяких термінів і основних положень, на яких слід зупинитися.

Прикладами випадкових функцій (ВФ) є стани людино-машинних систем під впливом навколишнього середовища.

При цьому під випадковим процесом розуміють процес випадкової зміни станів будь-якої фізичної чи технічної системи за часом або будь-яким іншим аргументом. Якщо позначити стан  $S_i$  і зобразити залежність  $S_i \in \mathcal{C}$ , то вона і буде випадковою функцією.

Випадкові процеси (ВП) класифікуються за видами станів  $S_i$  і аргументу  $t$ . При цьому ВП можуть бути з дискретними або безперервними станами чи

часом. Випадок відмови будь-якої машини можна віднести до ВП з дискретними станами, але безперервним часом. Якщо в ВП ймовірність переходу системи в кожний наступний стан залежить тільки від попереднього стану, то такий процес називається процесом без післядії.

Залежність  $P_{i/i+1} = f(\xi_i)$  називають перехідною ймовірністю.

Часто говорять, що саме процес без післядії має марківську властивість.

Марківський ВП є однорідним, якщо перехідні ймовірності  $P_{i/i+1}$  залишаються постійними в ході процесу. В деяких випадках, незважаючи на випадковість процесу, є можливість до певної міри керувати законами розподілу або параметрами перехідних ймовірностей. Такі марківські ланцюги називаються керованими.

Основною ознакою дискретного марківського ланцюга (ДМЛ) як моделі ЛМС є детермінованість часових інтервалів між окремими кроками (етапами) процесу. Однак часто в реальних процесах ця властивість не дотримується й інтервали виявляються випадковими з яким-небудь законом розподілу, хоча марківскість процесу зберігається. Такі випадкові послідовності називатимемо напівмарківськими.

Крім того, з урахуванням наявності і відсутності тих чи інших, згаданих вище, множин станів марківські ланцюги можуть бути поглинаючими, якщо є хоча б один поглинаючий стан, або ергодичними, якщо перехідні ймовірності утворюють ергодичну множину. В свою чергу, ергодичні ланцюги можуть бути регулярними або циклічними. У роботі дано класифікацію марківських процесів, які моделюють системи Л-М-С.

Під системою  $S$  розумітимемо будь-яку цілісну множину взаємопов'язаних елементів, яку не можна розчленувати на незалежні підмножини.

Основні результати цього розділу опубліковані в [2, 3].

**У другому розділі** досліджено практично важливе питання про адекватність застосування принципу максимуму ентропії для визначення тих параметрів – ймовірностей, які не можуть бути отримані іншим чином. Зокрема оглянуто роботи з різних галузей науки та практики, де застосовано цього принципу.

У 1948 році Шредінгер показав, що незалежно від того, використовуємо ми принцип максимуму ентропії в просторі  $S$  з обмеженням, що фіксує середнє  $\langle f \rangle$  на розподілі ймовірностей, чи застосовуємо теорему Байеса в  $S^n$  з умовним твердженням, що фіксує середнє  $\bar{f}$  за вибірковими значеннями, для великих  $n$ , ми отримуємо однакові розподіли в просторі. Цей результат поширюється також тоді, коли є кілька обмежень на середнє значення.

Це не тільки доводить узгодженість принципу максимуму ентропії з іншими принципами теорії ймовірностей, а й показує, наскільки потужним інструментом є даний принцип. Очевидно, що набагато простіше і доцільніше використовувати максимум ентропії, якщо розв'язується задача знаходження розподілу на  $S$ . Принцип максимуму ентропії відразу підводить до кінцевого

результату, виключаючи необхідність переходу в простір більш високої розмірності  $S^n$  та здійснення граничного переходу  $n \rightarrow \infty$ .

Це є відповіддю на запитання: «Наскільки можна довіряти результатам, отриманих за допомогою методу максимуму ентропії?».

Однак, необхідно з'ясувати значення отриманих зв'язків між частотами. Вони стосуються тільки кількості можливих способів, якими конкретні відносні частоти  $\{g_i\}$  можуть бути реалізовані відповідно до поставлених обмежень. Вони не стверджують, що частоти, отримані за принципом максимуму ентропії, будуть отримані в реальному експерименті; більш того, ні принцип максимуму ентропії, ні будь-який інший принцип теорії ймовірностей не може в точності передбачити, що відбудеться під час реального експерименту. Коректним твердженням є те, що: розподіл частот  $\{g_i\}$  з максимальною ентропією, обчислений за певних обмежень, з найбільшою ймовірністю спостерігатиметься в реальному експерименті, за умови, що фізичні обмеження, які виконуються під час експерименту, збігаються з обмеженнями, які враховувалися в ході обчислень.

У нашій математичній моделі «обмеження» – це якась інформація, яка приводить нас до зміни розподілу ймовірностей; в разі обмеження на середнє значення, шляхом додавання експонентної складової  $\exp[-\lambda f(x)]$  із змінним множником Лагранжа  $\lambda$ . Таким чином у роботі наведено обґрунтування (за допомогою прикладів) доцільність вибору методу максимізації інформаційної ентропії для отримання ймовірностей переходів між станами.

В результаті досліджень у даному розділі отримана структура та перелік основних властивостей систем типу «Людина-Машина-Середовище». Описано властивості марковських моделей для таких систем, що дозволило виділити коло завдань для моделювання:

- а) моделювання стаціонарної динаміки відновлення систем Л-М-С після аварій;
- б) моделювання динаміки відновлення систем Л-М-С після аварій при випадковому часу настання подій і, в тому числі – "мультикатастрофах";
- в) моделювання динаміки систем Л-М-С при нестационарному зовнішньому впливі;
- г) моделювання станів працездатності підсистеми "Людина" – ліквідатор аварії.

Наведено теоретичні обґрунтування та приклади використання методу максимізації ентропії. Зроблено висновок про придатність ентропійною моделі для опису ймовірностей стану здоров'я і працездатності підсистеми «Людина».

Основні результати цього розділу опубліковані в роботах [3, 43, 45, 70, 71].

**У третьому розділі** запропоновано статистичний метод визначення "нормальної працездатності" людини-оператора за даними аналізів формули крові для визначення правій частині обмежень в задачі максимізації інформаційної ентропії.



З аналізу формули судять про появи ускладнень, про паталогічні зміни, та можна обґрунтувати прогноз працездатності людини-оператора. Методи цілком можуть бути використані для отримання інформації про стан здоров'я людей і на основі інших даних, які не пов'язані з формулою крові.

Практична цінність проведених в даному розділі досліджень полягає в тому, що в них обґрунтовується і ілюструється порівняно новий і дуже ефективний підхід до визначення обмежень для визначення ймовірностей станів кровоносної системи живих організмів шляхом моделювання складних систем на основі їх макро - характеристичних показників.

Основні результати цього розділу опубліковані в роботі [74].

У четвертому розділі розглядається група з 600 об'єктів. Для кожної особини наведені абсолютні значення вмісту формули крові, підраховані їх математичне очікування, дисперсія, асиметрія і ексцес. Наприклад, статистичні характеристики для базофілів: 0,058667; 0,001099; -0,0306732; -1,17748.

Для складання обмежень знадобляться значення, які отримано у такий спосіб:

– групу даних по базофілам, що складається з 600 елементів впорядкуємо за зростанням;

– розіб'ємо отриману вибірку на 6 частин - 6 станів, в залежності від змісту базофілів в крові;

– Знайдемо середини кожної частини, які і є необхідними.

З урахуванням вище викладених вимог завдання оптимізації має вигляд:

$$S = - \sum_{j=1}^n p_j \log p_j \rightarrow \max_{p_j}, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n p_j = 1, \quad 0 \leq p_j \leq 1, \quad \sum_{j=1}^n x_j p_j = M, \quad \sum_{j=1}^n x_j^2 p_j - \left( \sum_{j=1}^n x_j p_j \right)^2 \leq D. \quad (2)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^n x_j - M^3}{\sqrt{D}^3} \leq A, \quad \frac{\sum_{j=1}^n x_j - M^4}{\sqrt{D}^4} - 3 \leq E. \quad (3)$$

Функція  $S$  опукла вгору по кожній змінній, а значить, максимум на опуклою області при опуклих обмеженнях (2) - єдиний. Але при наявності неопуклих обмежень (3) єдиність порушується.

Дана задача вирішена в математичному пакеті Mathematica; отримані результати для ентропії і перехідних ймовірностей процесу для усіх складових формули крові представлені у таблицях.

Результати досліджень за ентропійною моделлю показали, що величина ентропії, в контрольній групі здорових особин нижче, ніж показник ентропії в групі хворих особин. У досліджуваних групах, де встановлені запалення,

показник ентропії зростав в 1,08-1,29 рази. Це свідчить, що шкідливі і небезпечні процеси формують умови, що сприяють збільшенню кількості інформації, пов'язані в свою чергу зі створенням більшої невизначеності.

Основні результати цього розділу опубліковані в роботі [73, 93].

У п'ятому розділі як перше наближення запропоновано спрощену модель системи «людина-машина-середовище»; тут  $\lambda$  і  $\mu_i$  – константи,  $n$  – кількість етапів (операцій процесу відновлення).

Відмінності від класичної моделі: кожна операція має свою інтенсивність  $\mu_i$  при постійній інтенсивності аварій. Для рівнянь Колмогорова в цьому випадку, їх виведення і розв'язання мало відрізняються від класичного. Тобто, обґрунтування переходу до стаціонару і наявності граничних ймовірностей – також не відрізняються. Отримуємо розмічений граф станів, аналогічний процесу «загибелі та розмноження» (рис. 1):

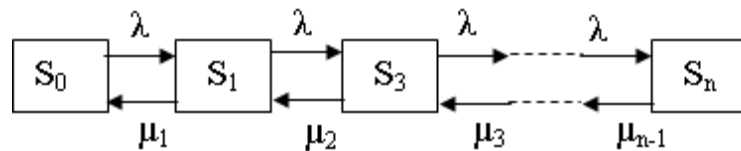


Рисунок 1 – Схема при  $i = 0, 1, 2, \dots, n$  при постійному переході вліво і вправо

Отримуємо розв'язання для ймовірностей станів, з яких  $P_0$ , безумовно, є найбільш цікавим.

$$\lambda p_0 = \mu_1 p_1, \quad \lambda p_1 = \mu_2 p_2, \quad \lambda p_{n-1} = \mu_n p_n, \quad \text{при } p_0 + p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1. \quad (4)$$

$$P_i = \frac{\lambda^i}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_i} P_0, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

$$\text{З умови (5.1) маємо: } P_0 = \left( \sum_{k=0}^n \frac{\lambda^k}{\prod_{i=1}^k \mu_i} \right)^{-1}.$$

Відомо, що для змінних  $\mu_i$  остання формула зберігається в сенсі середнього часу роботи на кожному етапі. Без істотної зміни результату можна запропонувати ряд подальших узагальнень на не-найпростіші потоки подій. При цьому, адекватність припущень слід перевірити чисельним експериментом на імітаційній моделі, або порівнянням з розв'язаннями рівняння Колмогорова.

$$1. \lambda \text{ подається ступінчастою функцією } \lambda_k, \text{ тоді } P_0 = \left( \sum_{k=1}^n \prod_{i=1}^k \lambda_i / \mu_i \right)^{-1};$$

2.  $\lambda$  і  $\mu$  – довільні, проте задовольняють умови стаціонарності та існування граничних ймовірностей  $P_i(t)$ , при  $t \rightarrow \infty$ .

Далі запропоновано модель системи при слабких руйнуваннях унаслідок аварії і зміни стану оператора в ході її ліквідації. Час і якість роботи під час аварії залежить від стану здоров'я людини-оператора, що, в свою чергу, залежить від стану системи (прямого шкідливого впливу, стресу). Ми припускаємо, що оператор може знаходитися, на відміну від підрозділу 1, тільки в двох станах, умовно кажучи, «повністю функціональний» і «частково функціональний». Ймовірність відновлення ефективності в процесі ліквідації аварії дорівнює нулю, а ймовірність нефункціонального стану в ході виконання  $i$ -ї операції дорівнює  $b_i$ . Після закінчення робіт, працездатність оператора буде відновлена, або він буде замінений. Тоді ймовірності переходу для кожної пари станів  $(i+1)$  та  $(i+1)_b$  з повною або частковою функціональністю оператора, відповідно, дорівнюють  $b_i \mu_i$  і  $(1-b_i) \mu_i$ . Стан системи, інтенсивність і ймовірність відновлення роботи системи при неповній функціональності оператора, відповідно,  $i_b$ ,  $\mu_b$  і  $P_{ib}$ . Розмічений граф станів наведений на рис. 2.

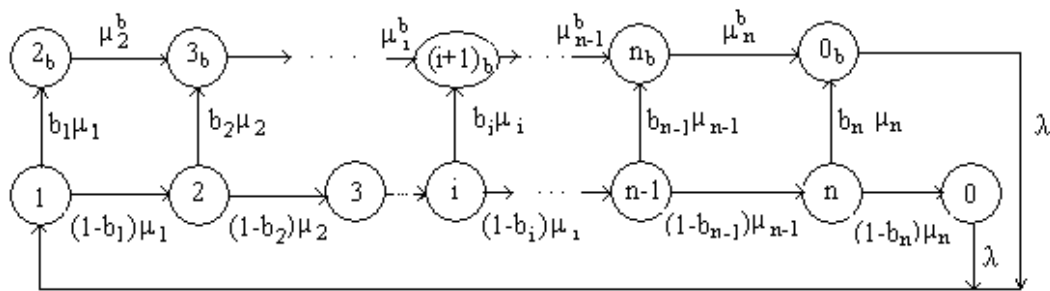


Рисунок 2 – Розмічений граф станів повної і неповної працездатності оператора

Зазначимо, що ймовірність захворювання людини-оператора в процесі виконання першої функції не відома і визначатиметься за допомогою «принципу максимуму інформаційної ентропії».

Використаємо 
$$\sum_{i=0}^n P_i + \sum_{i=2}^n P_{ib} + P_{0b} = 1. \quad (5)$$

Особливий інтерес становлять значення ймовірностей  $P_i^* = P_i + P_{ib}$ ,  $1 - P_0$  і  $P_{0b}$ . З рекурентних співвідношень (6), використавши (5), позначимо для  $k = 2, \dots, n$ :  
 Стаціонарні системи рівнянь для ймовірностей станів мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda P_{0b} + \lambda P_0 = \mu_1 P_1; \\ (1-b_1)\mu_1 P_1 = \mu_2 P_2; \\ b_1\mu_1 P_1 = \mu_2^b P_{2b}; \\ (1-b_2)\mu_2 P_2 = \mu_3 P_3; \\ \mu_2^b P_{2b} + b_2\mu_2 P_2 = \mu_3^b P_{3b}; \\ \dots\dots\dots \\ (1-b_i)\mu_i P_i = \mu_{i+1} P_{i+1}; \\ \mu_i^b P_{ib} + b_i\mu_i P_i = \mu_{i+1}^b P_{i+1,b}; \\ \dots\dots\dots \\ (1-b_n)\mu_n P_n = \lambda P_0; \\ \mu_n^b P_{nb} + b_n\mu_n P_n = \lambda P_{0b}. \end{array} \right. \quad (6)$$

$$B_k = \prod_{j=1}^{k-1} (1-b_j), \quad A_k = 1-B_k, \quad A_0 = A_1 = 0, \quad B_0 = B_1 = 1, \quad \sum_1 = \sum_0^n B_k / \mu_k, \quad \sum_2 = \sum_0^n A_k / \mu_k^b,$$

$$P_k = \frac{\Sigma_1}{(\Sigma_1 + \Sigma_2)} \quad \text{і} \quad P_{k,b} = \frac{\Sigma_2}{(\Sigma_1 + \Sigma_2)} \cdot P_k = \frac{B_k}{\mu_k(\Sigma_1 + \Sigma_2)}, \quad P_{k,b} = \frac{A_k}{\mu_k^b(\Sigma_1 + \Sigma_2)}, \quad \text{де } k=1\dots n;$$

$$P_0 = \frac{B_{n+1}}{\lambda(\Sigma_1 + \Sigma_2)}, \quad P_{0,b}^* = \frac{A_{n+1}}{\lambda(\Sigma_1 + \Sigma_2)}, \quad P_0^* = \frac{1}{\lambda(\Sigma_1 + \Sigma_2)}.$$

У наступному підрозділі набули подальшого розвитку моделі системи «людина-машина-середовище». Для вищеписаних моделей передбачалося, що потужність катастрофи не велика, і тому кожна нова подія "відсуває" процес відновлення тільки на один крок назад. З великою потужністю катастрофи відновлення щоразу починається спочатку, і граф станів, при n = 3, має вигляд (рис. 3):

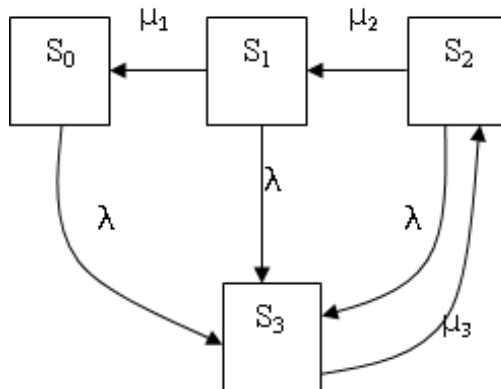


Рисунок 3 – Розмічений граф станів

Рівняння Колмогорова для цього випадку легко отримати:

$$\begin{aligned} P_0' &= -\lambda P_0 + \mu_1 P_1; & P_1' &= \mu_2 P_2 - \lambda + \mu_1 P_1; & P_2' &= \mu_3 P_3 - \lambda + \mu_2 P_2; & (7) \\ P_3' &= \lambda P_0 + \lambda P_1 + \lambda P_2 - \mu_3 P_3. \end{aligned}$$

У рівноважному випадку, розв'язуючи систему алгебраїчних рівнянь, отримуємо:

$$\begin{aligned} P_3 &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu_3}; & P_2 &= \frac{\lambda \mu_3}{(\lambda + \mu_3)(\lambda + \mu_2)}; \\ P_1 &= \frac{\lambda \mu_3 \mu_2}{(\lambda + \mu_3)(\lambda + \mu_2)(\lambda + \mu_1)}; & P_0 &= \frac{\lambda \mu_3 \mu_2 \mu_1}{(\lambda + \mu_3)(\lambda + \mu_2)(\lambda + \mu_1)\lambda}. \end{aligned} \quad (8)$$

Формули допускають очевидні узагальнення на випадок  $n$  етапів  $S$ .

За формулами (8) для реальних  $\lambda$  і  $\mu$  розраховано значення  $P_i$  для різних характерних випадків співвідношень інтенсивностей подій.

Як характеристика безпеки ситуації природно розглянути величину відношення середнього інтервалу аварій до середнього часу їх усунення:

$$\alpha = 1/\lambda / (1/\mu_1 + 1/\mu_2 + 1/\mu_3).$$

$$\text{Середній період аварії: } \tau = 1/\lambda + 1/\mu_1 + 1/\mu_2 + 1/\mu_3.$$

З метою визначення характерного часу  $T$  виходу на асимптотику, на рисунку 4 наведено характерний графік розв'язань рівняння Колмогорова (7) для порівняння з отриманими за формулами (8) числами.

Для  $\alpha = 0.3 < 1$  маємо:  $P_0=0.13$ ,  $P_1=0.16$ ,  $P_2=0.28$ ,  $P_3=0.43$ ;  $T = 10$ ,  $\tau = 14$ .

Для  $\alpha = 1.3 > 1$  маємо:  $P_0=0.5$ ,  $P_1=0.1$ ,  $P_2=0.2$ ,  $P_3=0.2$ ;  $T = 18$ ,  $\tau = 18$ .

Для  $\alpha \cong 1$  маємо:  $P_0=0.4$ ,  $P_1=0.2$ ,  $P_2=0.2$ ,  $P_3=0.2$ ;  $T = 20$ ,  $\tau = 21$ .

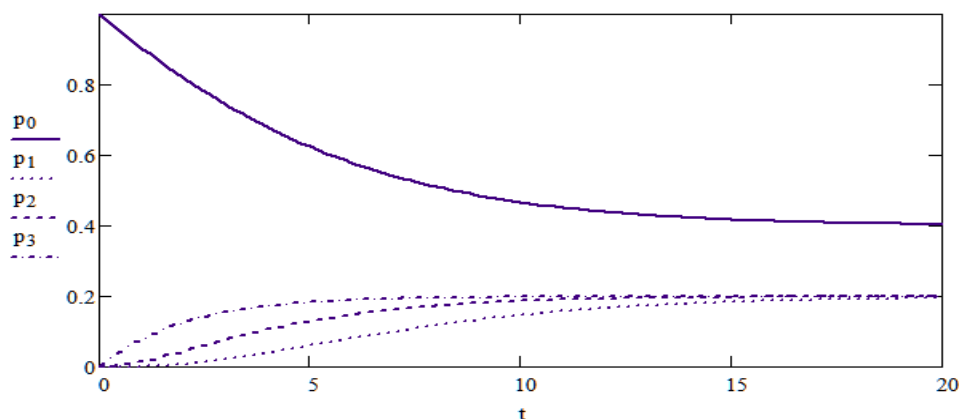


Рисунок 4 – Часова залежність ймовірностей станів і вихід на стаціонар

Результат  $T \cong \tau$  вказує збіг за порядком величин цього часу з середнім часом операцій та інтервалами між аваріями, що підтверджує законність переходу від

динамічної моделі до стаціонарної, причому, тим більше, чим небезпечніше ситуація ( $\alpha \ll 1$ ).

У підрозділі 5.4 запропоновано модель з вхідним потоком подій, інтенсивність якого змінюється з часом. Змодельємо поведінку системи у випадку, коли інтенсивність вхідного потоку подій залежить від часу і дорівнює  $\lambda(t)$ . Для цього складемо систему рівнянь Колмогорова, аналогічну системі «модель одноканальної СМО без черги». Ймовірності  $b_i$  знайдемо за допомогою методу максимуму інформаційної ентропії, розв'язавши варіаційну задачу, аналогічну завданню (рис. 2).

Отже, нехай у розглянутій системі для ліквідації аварії оператору необхідно послідовно виконати п'ять операцій, тобто  $n = 5$ . Це означає, що схема системи виглядатиме так, як показано на рисунку 5.

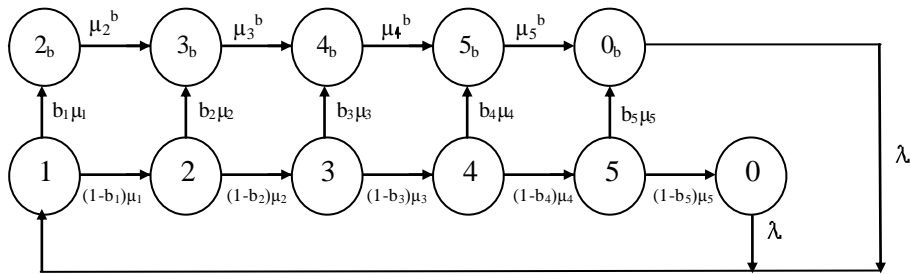


Рисунок 5 – Граф на п'ять операцій

Система рівнянь Колмогорова матиме вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 \lambda \langle \dot{P}_0 \rangle + \lambda \langle \dot{P}_{0b} \rangle - \mu_1 P_1 \langle \dot{P}_1 \rangle &= P_1' \langle \dot{P}_0 \rangle \\
 -b_1 \mu_1 P_1 \langle \dot{P}_1 \rangle - \mu_2 P_2 \langle \dot{P}_2 \rangle &= P_2' \langle \dot{P}_1 \rangle \\
 -b_2 \mu_2 P_2 \langle \dot{P}_2 \rangle - \mu_3 P_3 \langle \dot{P}_3 \rangle &= P_3' \langle \dot{P}_2 \rangle \\
 -b_3 \mu_3 P_3 \langle \dot{P}_3 \rangle - \mu_4 P_4 \langle \dot{P}_4 \rangle &= P_4' \langle \dot{P}_3 \rangle \\
 -b_4 \mu_4 P_4 \langle \dot{P}_4 \rangle - \mu_5 P_5 \langle \dot{P}_5 \rangle &= P_5' \langle \dot{P}_4 \rangle \\
 -b_5 \mu_5 P_5 \langle \dot{P}_5 \rangle - \lambda \langle \dot{P}_0 \rangle &= P_0' \langle \dot{P}_5 \rangle \\
 b_1 \mu_1 P_1 \langle \dot{P}_1 \rangle - \mu_2^b P_{2b} \langle \dot{P}_{2b} \rangle &= P_{2b}' \langle \dot{P}_1 \rangle \\
 b_2 \mu_2 P_2 \langle \dot{P}_2 \rangle + \mu_2^b P_{2b} \langle \dot{P}_{2b} \rangle - \mu_3^b P_{3b} \langle \dot{P}_{3b} \rangle &= P_{3b}' \langle \dot{P}_2 \rangle \\
 b_3 \mu_3 P_3 \langle \dot{P}_3 \rangle + \mu_3^b P_{3b} \langle \dot{P}_{3b} \rangle - \mu_4^b P_{4b} \langle \dot{P}_{4b} \rangle &= P_{4b}' \langle \dot{P}_3 \rangle \\
 b_4 \mu_4 P_4 \langle \dot{P}_4 \rangle + \mu_4^b P_{4b} \langle \dot{P}_{4b} \rangle - \mu_5^b P_{5b} \langle \dot{P}_{5b} \rangle &= P_{5b}' \langle \dot{P}_4 \rangle \\
 b_5 \mu_5 P_5 \langle \dot{P}_5 \rangle + \mu_5^b P_{5b} \langle \dot{P}_{5b} \rangle - \lambda \langle \dot{P}_{0b} \rangle &= P_{0b}' \langle \dot{P}_5 \rangle
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

У системі диференціальних рівнянь (9), як інтенсивність вхідного потоку  $\lambda$ , так і всі ймовірності станів є функціями від часу. Отже, результатом її

розв'язання будуть залежності ймовірностей знаходження системи в кожному з можливих станів від часу.

У рівноважному випадку, розв'язуючи систему алгебраїчних рівнянь, отримуємо:

$$\left. \begin{aligned}
 \lambda \overleftarrow{P_0} \overleftarrow{C} + \lambda \overleftarrow{P_{0b}} \overleftarrow{C} &= \mu_1 P_1 \overleftarrow{C} \\
 \overleftarrow{C} - b_1 \overleftarrow{\mu_1} P_1 \overleftarrow{C} &= \mu_2 P_2 \overleftarrow{C} \\
 \overleftarrow{C} - b_2 \overleftarrow{\mu_2} P_2 \overleftarrow{C} &= \mu_3 P_3 \overleftarrow{C} \\
 \overleftarrow{C} - b_3 \overleftarrow{\mu_3} P_3 \overleftarrow{C} &= \mu_4 P_4 \overleftarrow{C} \\
 \overleftarrow{C} - b_4 \overleftarrow{\mu_4} P_4 \overleftarrow{C} &= \mu_5 P_5 \overleftarrow{C} \\
 b_1 \mu_1 P_1 \overleftarrow{C} &= \mu_2^b P_{2b} \overleftarrow{C} \\
 b_2 \mu_2 P_2 \overleftarrow{C} + \mu_2^b P_{2b} \overleftarrow{C} &= \mu_3^b P_{3b} \overleftarrow{C} \\
 b_3 \mu_3 P_3 \overleftarrow{C} + \mu_3^b P_{3b} \overleftarrow{C} &= \mu_4^b P_{3b} \overleftarrow{C} \\
 b_4 \mu_4 P_4 \overleftarrow{C} + \mu_4^b P_{4b} \overleftarrow{C} &= \mu_5^b P_{5b} \overleftarrow{C} \\
 \overleftarrow{C} - b_5 \overleftarrow{\mu_5} P_5 \overleftarrow{C} &= \lambda \overleftarrow{P_0} \overleftarrow{C} \\
 b_5 \mu_5 P_5 \overleftarrow{C} + \mu_5^b P_{5b} \overleftarrow{C} &= \lambda \overleftarrow{P_{0b}} \overleftarrow{C}
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Тепер задамо вид функції  $\lambda(t)$ . Очевидно, що вона визначається конкретним типом катастроф або будь-яких інших зовнішніх впливів, що є причиною аварій, ліквідованих розглянутою системою. Розглянемо будь-який абстрактний зовнішній вплив (катастрофу), що є причиною ліквідованої аварії. Нехай відомо лише, що інтенсивність цього впливу змінюється таким чином: протягом перших двох годин спостерігається підвищення інтенсивності приблизно вдвічі (з 0.01 до 0.02), потім протягом дванадцяти годин інтенсивність різко зростає до свого максимуму (0.8), потім протягом п'яти – десяти діб вона плавно спадає майже до початкового значення. Нормуємо описаний часовий інтервал за часом так, щоб величина  $t$ , яка описує час, змінювалася від 0 до 100. При цьому розглянута одиниця часу відповідатиме приблизно двом годинам у реальних умовах. Відповідно до заданих умов за допомогою пакета Matlab задамо функцію  $\lambda(t)$  таким чином:

$$\lambda(t) = \begin{cases} 0.79e^{-0.12137354(x-7)^2} + 0.01, & 0 \leq t \leq 7, \\ 0.78e^{-0.005(x-7)^{1.8}} + 0.02, & 7 < t \leq 100. \end{cases}$$

Коефіцієнти і точний вид функції підібрані так, щоб задовольнити зазначені вище вимоги і забезпечити достатню гладкість для роботи чисельних методів, використовуваних пакетом Matlab. Таким чином, при  $t=0$   $\lambda(t) \approx 0.01$ , при  $t=1$

(тобто через дві години після початку розглянутого інтервалу)  $\lambda(t) = 0.02$ , при  $t = 7$   $\lambda(t) = 0.8$  – це максимум. Графік функції  $\lambda(t)$  наведено на рисунку 6.

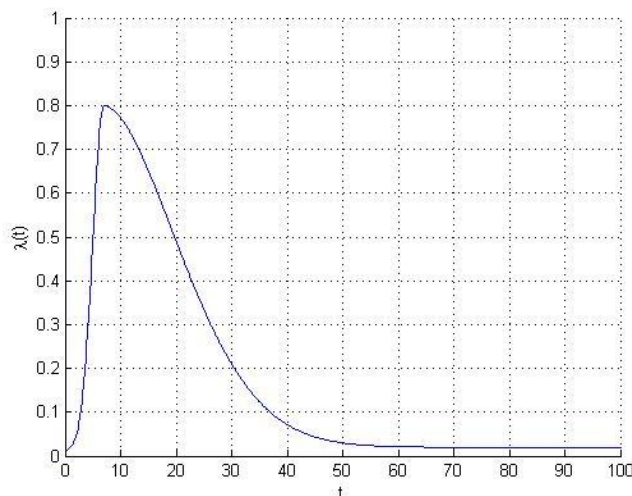
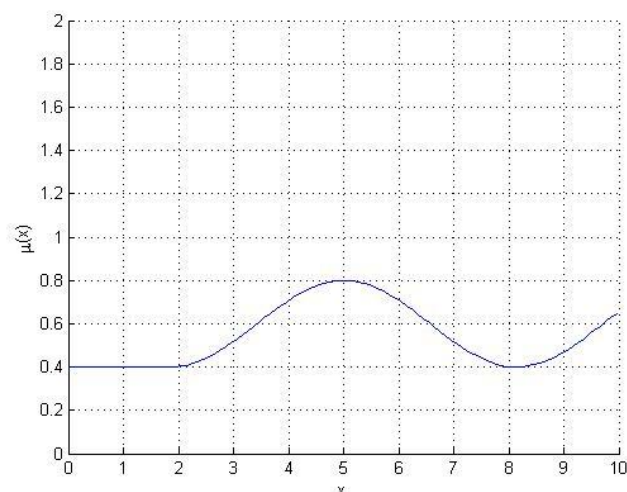


Рисунок 6

Далі розглянемо, як змінюється інтенсивність роботи людини-оператора під час виконання операцій з ліквідації аварій. Можна припустити, що максимум ефективності роботи оператора припадає приблизно на середину робочої зміни. Потім починається поступове її зниження до початкового рівня. До кінця зміни ефективність може знову зростати, що обумовлено поспіхом і бажанням швидше виконати роботу. Грунтуючись на даних міркуваннях, задамо функцію розподілу інтенсивності виконання операцій з ліквідації аварій як показано на рисунку 7.

Рисунок 7 – Емпірична залежність змінної  $\mu$ 

Для знаходження ймовірностей  $b_i$  скористаємося принципом максимуму інформаційної ентропії і складемо варіаційну задачу:



$$S_I = -\sum_{i=1}^2 p_i \ln p_i, \quad 36.5p_1 + 38p_2 \leq 37.$$

Розв'язуючи цю задачу за допомогою пакета Mathematica, отримаємо такі значення:

$$p_1=0.666668; \quad p_2=0.333332; \quad \text{тут } p_2 = b_i, \quad i = \overline{1, \dots, 5}.$$

Тепер введемо всі величини, необхідні для розв'язання системи (7). Для цього скористалися функцією NDSolve пакета Mathematica. В результаті отримуємо графіки залежності ймовірностей знаходження системи в кожному з можливих станів від часу. Результати програми, що виконує всі зазначені дії в пакеті Mathematica та графіки, які є результатом дії пакета Math, наведені у додатку А. Графіки деяких, найбільш характерних залежностей, наведені на рисунках 8 – 9. За результатами розрахунків видно, що коли інтенсивність  $\lambda(t)$  вхідного потоку подій перестає змінюватися з часом, система переходить в стаціонарний стан, тобто ймовірності станів  $P_i$  і  $P_{ib}$  стають постійними.

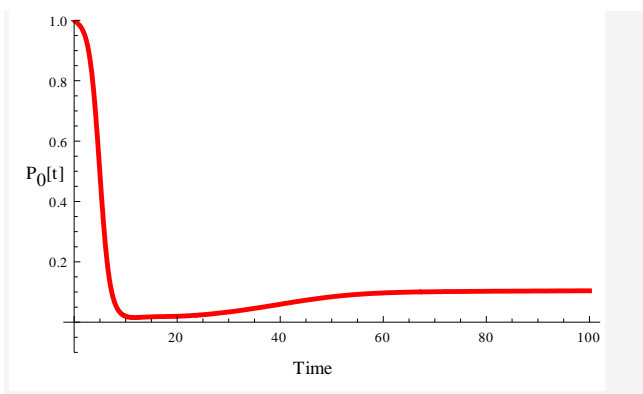


Рисунок 8 – Залежність  $P_0$  від часу

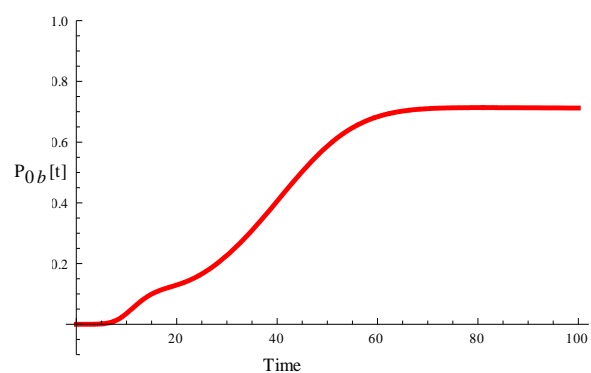


Рисунок 9 – Залежність  $P_{0b}$  від часу

Нижче наведено деякі ймовірності станів, які є найцікавішими на практиці:

а) ймовірність того, що оператор виконав всі операції і при цьому хворий:

$$P_{0b} = 0.712271;$$

б) ймовірність того, що оператор виконує 1-у операцію:  $P_1^* = P_1 = 0.0408194$ ;

в) ймовірність виконання 2-ї операції:

$$P_2^* = P_2 + P_{2b} = 0.0247519 + 0.0165012 = 0.0412531;$$

г) ймовірність виконання 3-ї операції:

$$P_3^* = P_3 + P_{3b} = 0.00907101 + 0.0151182 = 0.0241892;$$

д) ймовірність виконання 4-ї операції:

$$P_4^* = P_4 + P_{4b} = 0.0110009 + 0.0348362 = 0.045837$$

е) ймовірність виконання 5-ї операції:

$$P_5^* = P_5 + P_{5b} = 0.00491105 + 0.0266019 = 0.031513$$

е) ймовірність того, що оператор виконує будь-яку з операцій:

$$1 - P_0 = 1 - 0.816388 = 0.183612.$$

У підрозділі 5.6 наведено досвід реального використання однієї з моделей. Вона на "якісному" рівні добре описує так звану "Диканівську катастрофу" в головному колекторі водовідведення м. Харкова в липні 1995р. За допомогою програми на С++ чисельним методом вирішена задача оптимізації вартості відновлювальних робіт. З 60 локальних мінімумів обраний глобальний - мінімальне значення вартості 0.0438 умовних одиниць і матрицю перехідних ймовірностей, для якої він досягається.

Далі в якості об'єкта впровадження розглянута **енерго-система**, що має такі стани:

S0 - система повністю справна і працює;

S1 - дрібні порушення роботи;

S2 - серйозні порушення роботи;

S3 - аварія.

Витрати  $C_j$ , необхідні на обслуговування системи в кожному стані були відомі. Введено очевидне умова, що вони зростають у разі при переході до кожного наступного стану. У результаті розрахунків виявилось, що це припущення визначає стійкість рішень задачі мінімізації загальних витрат, описаної раніше в підрозділі 5.1:

$$C = \sum C_j \cdot P_j (p_{10}, p_{21}, p_{30}, p_{32}, \dots) \rightarrow \min,$$

де  $P_j$  - елементи кожного з рядків матриці  $P^{10} \approx P^\infty$ .

Знайдено сталий глобальний мінімум вартості, який не залежить от початкової точки процесу. Такий несподіваний для неопуклої задачі результат частково пояснюється спеціальними (для даного об'єкта) векторами вартостей  $C_j$  (вони строго зростаючі) і ймовірностей станів  $P_j$  (вони строго спадають).

Дана модель і результати впроваджені у Науково-виробничому підприємстві "Електропром".

## ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження сформульовано і вирішено важливу науково-технічну проблему моделювання процесів ліквідації аварій та надзвичайних ситуацій в системах Л-М-С. Для цього в роботі запропоновані математичні моделі, і з їх допомогою досліджено процеси ліквідації аварій в людино-машинних системах, у тому числі:

- модель з дискретним часом процесу ліквідації аварій в замкнутій стаціонарній системі Л-М-С;

- динамічні моделі систем Л-М-С (спрощена, а також з урахуванням стану працездатності людини);

- моделі на випадок мультикатастроф у системах Л-М-С;

- набув подальшого розвитку метод «максимуму інформаційної ентропії» для визначення параметрів здоров'я і працездатності оператора за спостережуваними макрохарактеристиками;

- удосконалено метод середніх оцінок для ймовірностей станів, що дозволило застосувати формули, отримані для стаціонарного випадку до нестаціонарного потоку аварій в системах Л-М-С;

- визначено умови та величини керуючих параметрів  $\mu$  і  $b$ , необхідні для того, щоб ймовірність працездатного стану системи і здоров'я оператора перевищувала ймовірності всіх інших станів;

- запропоновано і відпрацьовано методику оцінки працездатності оператора за його піднаглядними макропараметрами;

- отримані в результаті численних експериментів тимчасові залежності для ймовірностей станів дозволяють визначити час встановлення динамічних процесів у системі Л-М-С з нестаціонарними потоками аварій і показати правомірність оцінки осереднених ймовірностей станів за середніми інтенсивностям подій;

- запропоновані моделі природно узагальнені на випадок мультикатастроф (ерлангівський потік і поглинаючі стани), проте сьогодні стає зрозуміло, що аварії, а тим більше катастрофи, мають інші закони розподілу — показникові. Це призводить до більш складних, ніж СМО математичних моделей, для яких не працює класична теорема Хінчина про збіжність до найпростішого потоку.

Припущення, в рамках якого марківський підхід адекватно моделює систему, полягає в простоті потоку подій і стаціонарності. При дуже малих  $\lambda \ll 1$  це справедливо і для потоку аварій. Однак з експоненціального розподілу довжин інтервалів між аваріями випливає, що найбільш вірогідні короткі інтервали. Таким чином, модель найбільше підходить для рятувальних підрозділів, для яких ліквідація аварії є «стаціонарний стан».

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів і висновків дисертаційної роботи забезпечується і підтверджується коректним використанням основних положень відомого і апробованого математичного апарату, який проведений експериментальним дослідженням та застосуванням даних результатів під час дослідження аварій електромереж у НВП «Електропром».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Razi J. Alazawi Markovian Approach To Man-Machine-Environment Systems / R. J. Alazawi // Радиотехника, – 2012. – №170 – С.14–18.
2. Naumeyko I. V. Another dynamic model of Markovian Human-Machine-Environment system that is effected by some hazard / I.V. Naumeyko, R. J. Alazawi // Радиотехника. – 2013. №172– С. 118–124.

3. Наумейко И. В. Анализ псевдохаотического поведения кейнсианских моделей экономики / И. В. Наумейко, Р. Дж. Аль-Азави, В. А. Алрефаи // Вестник национального технического университета "ХПИ". – 2013. № 26 – С. 59–64.
4. Наумейко И. В. Марковская модель ликвидации нестационарного потока аварий при ограничениях на работоспособность оператора / И. В. Наумейко, Р. Дж. Аль-Азави, В. А. Алрефаи // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. Том 3, № 4(63). – С. 20–23.
5. Аль-Азави Р. Дж. Устойчивость многостадийного процесса восстановления при катастрофах с переменной интенсивностью / Р. Дж. Аль-Азави // Технологический аудит и резервы производства. – 2013 Том 5, № 4(13). – С. 4–5.
6. Аль-Азави Р. Дж. Моделирование аварий и их ликвидации в эргатических системах / Р. Дж. Аль-Азави // Технологический аудит и резервы производства. – 2013, № 6/4(14). – С.39 – 41.
7. Наумейко И.В. Модели систем «Человек-Машина-Среда» с восстановлением при неклассических потоках событий / И.В. Наумейко, Р. Дж. Аль-Азави // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Том 2, № 10(62). – С. 55–58.
8. Аль-Азави Р. Дж. III. Модель восстановления объекта при периодических катастрофах / Р. Дж. III. Аль-Азави // Радиотехника. – 2014. – №178. – С. 130 – 133.
9. Naumeyko I. V. A direct simulation of solutions for nonlinear rate equations of directly modulated semiconductor laser / I. V. Naumeyko, R. J. Alazawi // 4-й Международный радиоэлектронный форум«Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» 18-21 октября, МРФ-2011 г., – С. 68–69.
10. Аль-Азави Р. Дж. Об одном подходе к моделированию человеко-машинных систем восстановления в критических ситуациях / Р. Дж. Аль-Азави // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» 17–19 апреля 2012. – С. 131–132.
11. Аль-Азави, Р. Дж. Моделирование Человеко-Машинных Систем восстановления в критических ситуациях с помощью процессов гибели и размножения / Р. Дж. Аль-Азави // Материалы XVII-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI Веке» – Том 7, 2013. – С. 92–93.
12. Al-Azawi R. J. A dynamic model of Markovian Human-Machine-Environment system that is effected by some hazard / R. J. Al-Azawi // Инновационный потенциал украинской науки – XXI век, Харьков 2013. – Том 2. – С. 95–96.
13. Naumeyko I. V. One Dynamic Model Of Markovian Human-Machine-Environment System / I.V. Naumeyko, R. J. Alazawi // 2-я Международная

научно-технологическая конференция «Инновационные системы и технологии» ИСТ. – 2013. – С. 9.

14. Аль-Азави, Р. Дж. Марковские модели процессов ликвидации аварий в человеко-машинных системах / Р. Дж. Аль-Азави // Материалы XVIII-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI Веке» – 2014, Том 7 – С.142–143.
15. Аль-Азави Р. Дж. Марковские модели процессов ликвидации аварий в человеко-машинных системах / Р.Дж. Аль-Азави // Информационные системы и технологии: материалы 3-й Международ. науч.-техн. конф., Харьков, 15-21 сентября 2014 г.: тезисы докладов / [редкол.: А.Д. Тевяшев(отв. ред.) и др.]. – Х: НТМТ, 2014. – С.15–16.

## АНОТАЦІЯ

**Разі Джабур Аль-Азаві.** Марківські моделі процесів ліквідації аварій в людино-машинних системах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, 2014.

Процес ліквідації аварії у всіх моделях відбувається в кілька етапів, з різними інтенсивностями і можливими багаторазовими повтореннями етапів у випадку «мультикатастроф». Запропоновано марківську модель, в якій ймовірності зміни станів здоров'я оператора в ході ліквідації аварії знайдені за допомогою принципу максимізації інформаційної ентропії. Оцінено час стабілізації процесу і адекватність заміни динамічної моделі на стаціонарну. Введено та досліджено критерій безпеки ситуації, як відношення середнього періоду між аваріями до середнього часу відновлення.

**Ключові слова:** Людино-машинна система, відновлення працездатності, ланцюг Маркова, рівняння Колмогорова, максимальна ентропія.

## АННОТАЦИЯ

**Рази Джабур Аль-Азави** Марковские модели процессов ликвидации аварий в человеко-машинных системах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки Украины, 2014.

Рассмотрены системы типа "человек - машина - среда" как с классическим простейшим потоком внешних событий (аварий), так и с нестабильным источником стихийных бедствий с различными видами плотности, аппроксимированными кусочно-постоянными и другими типами

функций. Процесс ликвидации аварии во всех моделях происходит в несколько этапов, с различными интенсивностями и возможными многократными повторениями этапов в случае «мультикатастроф». Предложены марковские модели, в которых вероятность каждого состояния определяется из решений уравнений Колмогорова, причем часть переходных вероятностей является только наблюдаемыми переменными, которые определяются неблагоприятными внешними факторами (отказами систем, стихийными бедствиями, неучтенными человеческими факторами и т.д.) Остальные – управляемые – определяются ходом восстановительных работ. Вероятности изменения состояний здоровья оператора при ликвидации аварии найдены с помощью принципа максимизации информационной энтропии. Оценено время стабилизации процесса и адекватность замены динамической модели на стационарную. Введен и исследован критерий безопасности ситуации, как отношение среднего периода между авариями к среднему времени восстановления.

**Ключевые слова:** Человеко-машинные системы, восстановление работоспособности, цепь Маркова, уравнения Колмогорова, максимальная энтропия.

### ABSTRACT

**Razi Jabur Al-Azawi** Markov models Processes incidents in Man-Machine Systems . – Manuscript.

The thesis for the scientific degree of Candidate of Technical sciences by specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – Kharkov National University of Radio electronics, Ministry of education and science of Ukraine, 2014.

The “Man-machine-environment” system is considered. It has either classic flow of events, or a flow of unstable of natural disasters with different densities, that are approximated by piecewise constant functions. The process of liquidation of the accident in all the models is held in several stages, with different intensities. The phases can be made repeatedly in the case of "multi-catastrophes". The Markovian model is presented, in which the probability of changes in health of the operator in the process of liquidation of the accident is found using the principle of maximizing the information entropy. The stability time of the process and the value of changing the dynamic model to stationary one are estimated. The safety criterion of situation that is the ratio of the average time between failures and mean time of recovery is introduced and investigated.

Key words: Human-Machine System, Recovery, Markov chain, Kolmogorov equations, Maximum entropy

Підп. до друку 25.11.2014.      Формат 60x84 1/16.      Спосіб друку – ризографія.  
Умов.друк.арк. 1,2.              Облік. вид.арк. 1,0.      Тираж 100 прим.  
Ціна договірна.                      Зам №

---

ХНУРЕ. Україна. 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---

Віддруковано в навчально-науковому  
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ  
61166, Харків, просп. Леніна, 14