

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СКЛАДНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМ

Abstract: Calculation technique of availability and mean time between failures of geographically distributed system hardware is introduced. Technique is based on Markov process theory. Research can be used for evaluation and analysis of project reliability for designing or modernizing management-information system or another program-technical complex.

Key words: availability, mean time between failures, Markov process, mathematical model, differential equations, reliability.

Анотація: Пропонується методика розрахунку коефіцієнта готовності та середнього напрацювання на відмову технічних засобів територіально розподілених систем. Методика використовує теорію марковських процесів. Робота може бути застосована для проектної оцінки та аналізу надійності інформаційно-управляючих систем та інших програмно-технічних комплексів, що розробляються або модернізуються.

Ключові слова: коефіцієнт готовності, напрацювання на відмову, марковський процес, математична модель, диференціальні рівняння, надійність.

Аннотация: Предлагается методика расчета коэффициента готовности и средней наработки на отказ технических средств территориально распределенных систем. Методика использует теорию марковских процессов. Работа может быть применена для проектной оценки и анализа надежности разрабатываемых или модернизируемых информационно-управляющих систем и других программно-технических комплексов.

Ключевые слова: коэффициент готовности, наработка на отказ, марковский процесс, математическая модель, дифференциальные уравнения, надежность.

1. Вступ

При проектуванні сучасних інформаційно-управляючих систем (ІУС) важливе місце займають проектна оцінка та аналіз їх надійності. Визначивши необхідні аспекти надійності ІУС та її стійкості у відношенні відмов, на етапі проектування можна підвищити рівень живучості системи та зменшити витрати на її розгортання.

Інформаційно-управляючі системи відносяться до складних багатофункціональних та багатоелементних систем, що містять три основні компоненти: комплекс технічних засобів (КТЗ), програмне забезпечення (ПЗ) та оперативний персонал (ОП). Методологію оцінки складних ІУС з урахуванням показників надійності КТЗ, ПЗ та ОП викладено та рекомендовано у наукових публікаціях і державних стандартах [1–3]. У статті [3] докладно описано методику розрахунку коефіцієнтів готовності ПЗ та ОП, але запропонований підхід до розрахунку показників надійності для ієрархічних інформаційних систем не може бути використаний у повній мірі для складних ІУС без явно вираженої ієрархії з довільним зв'язком між об'єктами.

Для оцінки надійності функціонально складних технічних систем рекомендовано, зокрема, використовувати марковський аналіз, що ґрунтується на теорії марковських процесів і забезпечує високу точність результатів розрахунків. Але марковський аналіз використовується рідко внаслідок складності систем диференціальних рівнянь, що супроводжують ці розрахунки [4]. Тому зроблено спробу використати методику оцінки надійності комплексу технічних засобів (КТЗ) розгалужених ІУС, засновану на марковській моделі надійності, шляхом позбавлення від необхідності вирішення системи рівнянь та виділення логічних фрагментів системи з наступним узагальненням показників надійності для системи в цілому. У методиці використано аналітичний підхід до оцінки надійності

системи із визначенням таких показників надійності, як коефіцієнт готовності та тривалість напрацювання на відмову.

2. Основні визначення та обрані показники надійності

Для більшості ІУС перехід у критичний стан (характеризується довговічністю), не допустимий для їх функціонування у режимах зберігання або транспортування (характеризується збережуваністю), не передбачено. Тому зупинимось на оцінці двох властивостей надійності: безвідмовність (властивість системи виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку) і ремонтпридатність (властивість системи бути пристосованою до підтримання та відновлення стану, в якому вона здатна виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування та ремонту). Комплексною характеристикою безвідмовності і ремонтпридатності системи є коефіцієнт готовності.

Аналітичний підхід до оцінки показників надійності (коефіцієнта готовності, середнього напрацювання на відмову) базується на незалежному обліку потоку відмов (збоїв) за рахунок різних чинників: КТЗ, ПЗ та ОП, що впливають на функціонування ІУС.

Інформаційно-управляючу систему у загальному вигляді можна представити як сукупність серверних вузлів, об'єднаних телекомунікаційною мережею (ТМ). Під серверними вузлами будемо розуміти оснащені серверами (кластерами) та робочими станціями (РС) комплекси засобів автоматизації об'єктів автоматизації всіх рівнів. При розрахунку надійності враховуються серверні вузли, задіяні у виконанні відповідної функціональної задачі.

Ознакою серверного вузла кожного об'єкта автоматизації є наявність сервера (кластера) та автоматизованих робочих місць (АРМ), об'єднаних локальною обчислювальною мережею (ЛОМ). Під АРМ будемо розуміти РС, оснащені периферійними пристроями (сканерами, принтерами, системами відображення).

3. Математична модель оцінки надійності КТЗ ІУС

Представимо складну ІУС як сукупність елементів (серверні вузли та канали зв'язку (КЗ) ТМ між ними), кожному з яких властивий коефіцієнт готовності. У свою чергу, серверні вузли можуть бути представлені як сукупність елементів (сервери, кластери, АРМ та КЗ ЛОМ між ними), що характеризуються відповідними коефіцієнтами готовності. Схемою такого розбиття КТЗ системи є граф, де вершини – моделі елементів КТЗ, а ребра – КЗ між цими елементами.

Випадковий процес із дискретними станами і неперервним часом, що буде протікати у такій системі, можна назвати марковським, тобто для будь-якого моменту часу t умовні імовірності всіх станів системи S у майбутньому (при $t > t_0$) залежать тільки від того, у якому стані s_j знаходиться система S у теперішній час (при $t = t_0$), але не залежать від того, коли і яким чином вона перейшла у цей стан (тобто, якими були стани системи у минулому (при $t < t_0$)) [5]. Застосуємо до системи марковську модель розрахунку надійності.

Визначимо показники надійності елементів.

Середнє напрацювання елемента на відмову – середньостатистична тривалість безвідмовної роботи елемента:

$$T_{\text{відм}} = \sum_{i=1}^N \frac{t_{\text{инп}}}{N}, \quad (1)$$

де $t_{\text{инп}}$ – тривалість i -го інтервалу безперервної роботи системи, N – кількість відмов.

Інтенсивність відмов:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[X(t, \Delta t)]}{\Delta t}, \quad (2)$$

де $M[X(t, \Delta t)]$ – математичне очікування випадкової кількості відмов, які припадають на елементарний проміжок часу $(t, t + \Delta t)$.

Інтенсивність відмов обернено пропорційна середньому напрацюванню на відмову:

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{відм}}}. \quad (3)$$

Середня тривалість відновлення елемента:

$$T_{\text{відн}} = \sum_{i=1}^N \frac{t_{\text{инп}}}{N}, \quad (4)$$

де $t_{\text{инп}}$ – тривалість простою системи, викликаного i -ю відмовою, N – кількість відмов.

Інтенсивність відновлень – обернена середній тривалості відновлення величина:

$$\mu = \frac{1}{T_{\text{відн}}}. \quad (5)$$

Коефіцієнт готовності – імовірність знаходження елемента в робочому стані у довільний момент часу:

$$K_2 = \frac{T_{\text{відм}}}{T_{\text{відм}} + T_{\text{відн}}} = \frac{\mu}{\mu + \lambda}. \quad (6)$$

За умови, що елементи КТЗ та КЗ у системі небезвідмовні та відновлювані, можна отримати ергодичну множину станів системи. Застосувавши до системи марковську модель, отримуємо граф із 2^n станів системи із n елементів, який показано на рис. 1.

Складемо за графом систему диференціальних рівнянь Колмогорова. Для кожного стану s_i системи S запишемо рівняння вигляду

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{2^n} p_j(t) \lambda_{ji}(t) - p_i(t) \sum_{j=1}^{2^n} \lambda_{ij}(t), \quad (7)$$

де $p_i(t)$ – імовірність знаходження системи S у стані s_i у часі, $\lambda_{ji}(\lambda_{ij})$ – інтенсивність потоку подій, що ведуть до переходу зі стану $s_j (s_i)$ у стан $s_i (s_j)$, перша сума для всіх j таких, що

$\lambda_{ji} \neq 0$, тобто можливий безпосередній перехід із s_j у s_i , друга сума для всіх j таких, що $\lambda_{ij} \neq 0$, тобто можливий безпосередній перехід із s_i у s_j .

Доповнимо систему рівнянь нормуючою умовою

$$\sum_{i=1}^{2^n} p_i(t) = 1. \quad (8)$$

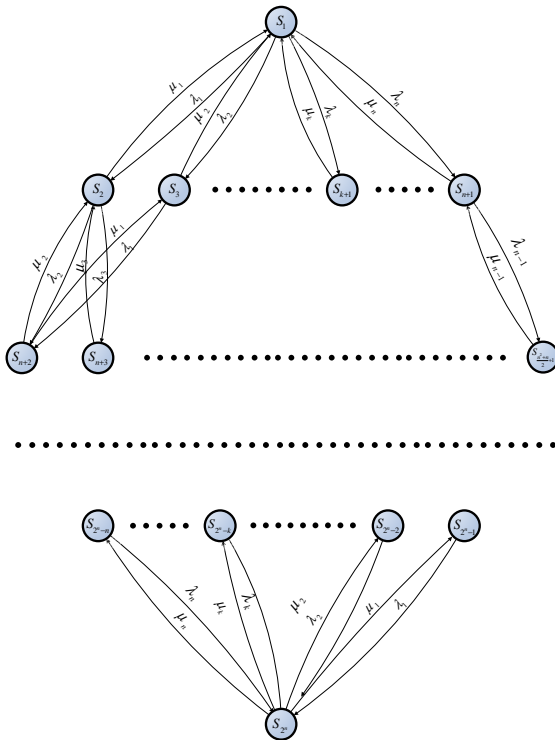


Рис. 1. Розмічений граф станів системи S

Нормуюча умова:

$$p_1(t) + p_2(t) = 1. \quad (11)$$

Вирішивши цю систему рівнянь, отримаємо імовірності знаходження системи S_1 у станах $s_1(p_1(t))$ та $s_2(p_2(t))$.

$$p_1(t) = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} e^{-(\lambda_1 + \mu_1)t},$$

$$p_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} (1 - e^{-(\lambda_1 + \mu_1)t}). \quad (12)$$

У стаціонарному режимі імовірність знаходження системи у певному стані у будь-який момент часу залишається незмінною (при $t \rightarrow \infty$). Тоді

Початкові умови для системи диференціальних рівнянь:

$$t = 0: p_1(0) = 1, \forall i \in \{2..2^n\} p_i(0) = 0, \quad (9)$$

тобто у початковому стані система S справна.

Розрахуємо систему S_1 , що складається лише із одного елемента, якому властиві λ_1 – інтенсивність відмов та μ_1 – інтенсивність відновлень.

Будемо вважати у початковий момент часу систему справною.

Складемо для неї рівняння Колмогорова:

$$\frac{dp_1(t)}{dt} = p_2(t)\mu_1 - p_1(t)\lambda_1,$$

$$\frac{dp_2(t)}{dt} = p_1(t)\lambda_1 - p_2(t)\mu_1. \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} = \frac{T_{\text{відм}}}{T_{\text{відм}} + T_{\text{відн}}} = K_2, \\
 p_2 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} = \frac{T_{\text{відн}}}{T_{\text{відм}} + T_{\text{відн}}} = 1 - K_2.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

4. Розрахунок показників надійності системи

Для проведення розрахунків необхідно провести ієрархічне розбиття системи на підсистеми. Метою даного розбиття є виділення логічних з точки зору стійкості до відмов фрагментів системи разом із зменшенням обсягу обчислень.

Система може бути представлена диз'юнктивним сімейством підсистем, кожна із яких сама по собі буде вершиною чи вузлом графа і характеризуватиметься власними показниками надійності.

На даному етапі слід виділяти фрагменти таким чином, щоб можна було однозначно визначити справність кожного із них.

Множина станів системи розбивається на дві підмножини (справних станів і тих, у яких система несправна) у залежності від критерію працездатності. Для спрощення оцінки працездатності системи на множині усіх станів, а також із метою спрощення розрахунку коефіцієнта готовності системи можна виділити множини поглинаючих робочих станів та поглинаючих неробочих станів системи. Назвемо множиною поглинаючих неробочих станів таку підмножину множини неробочих станів системи, де відновлення кожного неробочого елемента веде до безпосереднього переходу у робочий стан, а відмова кожного робочого елемента веде до переходу у неробочий стан. Аналогічно множиною поглинаючих робочих станів будемо називати таку підмножину множини робочих станів системи, де відмова кожного робочого елемента веде до безпосереднього переходу у неробочий стан, а відновлення кожного неробочого елемента веде до переходу у робочий стан. Знаючи вказані вище множини станів, можна встановити працездатність будь-якого стану системи без безпосередньої перевірки критерію працездатності системи.

На основі розрахунків системи S_1 (п. 3), вважаючи, що вона є підсистемою будь-якої системи S , можна отримати імовірність знаходження системи S у будь-якому стані як добуток імовірностей знаходження у відповідних станах окремих елементів системи:

$$p_i(t) = \prod_{j=1}^n p_{ji}(t),
 \tag{14}$$

де $l \in \{1; 2\}$, p_{j1} – імовірність знаходження j -ого елемента системи у робочому стані (K_2), p_{j2} – імовірність знаходження j -ого елемента системи у неробочому стані ($1 - K_2$).

Індекс l вибирається у залежності від того, у якому стані входить j -й елемент у даний стан s_i системи S .

Задавшись відповідним критерієм працездатності системи (на даному етапі прискорити розрахунок можна, звернувшись за допомогою до визначених вище множин поглинаючих робочих та неробочих станів), знайдемо імовірність перебування системи у робочому стані як суму

імовірностей перебування системи у відповідних станах s_i (множина станів, у яких ми визначили систему справною):

$$K_z = P(t) = \sum_{i=1}^{2^n} p_i(t) \cdot k_i, \quad (15)$$

де $k_i \in \{0;1\}$ – коефіцієнт справності системи у стані s_i .

Таким чином може бути розрахована імовірність знаходження у справному стані окремого фрагмента системи.

Для розрахунку середньої тривалості напрацювання системи на відмову (середньої тривалості відновлення) застосуємо поняття множини граничних робочих (неробочих) станів. Назвемо множиною граничних робочих (неробочих) станів таку підмножину множини робочих (неробочих) станів системи, де із кожного стану можливий безпосередній перехід у неробочий (робочий) стан системи.

Вважаючи систему справною, можна знайти інтенсивність відмов як добуток сум інтенсивностей переходу системи із робочого стану у неробочий на імовірність знаходження системи у кожному із множини граничних робочих станів:

$$\lambda = \frac{1}{K_z} \sum_{i=1}^{2^n} p_i(t) \cdot k_{pi} \cdot \sum_{j=1}^{2^n} \lambda_{ij} \cdot k_{nj} \quad \forall \lambda_{ij} \neq 0, \quad (16)$$

де k_{oi} – коефіцієнт належності стану s_i множині граничних робочих станів, k_{ij} – коефіцієнт належності стану s_j множині граничних неробочих станів.

Середню тривалість напрацювання на відмову знайдемо із формули (3).

Аналогічно для середньої інтенсивності відновлень системи:

$$\mu = \frac{1}{1 - K_z} \sum_{i=1}^{2^n} p_j(t) \cdot k_{nj} \cdot \sum_{i=1}^{2^n} \mu_{ji} \cdot k_{pi} \quad \forall \mu_{ji} \neq 0. \quad (17)$$

Середню тривалість відновлення знайдемо із формули (5).

5. Приклад розрахунку

Згідно із запропонованою методикою, розроблено алгоритм та програмний продукт для розрахунку показників надійності КТЗ складних ІУС. Логіку розробленого алгоритму можна проілюструвати на прикладі розрахунку системи, що складається із 7 серверних вузлів та 8 КЗ ТМ. Схема системи представлена графом на рис. 2.

Для серверних вузлів M_1, M_2, M_3 $K_z = 0,9964$, $T_{відм} = 6643 год (\lambda = 1,50534 \cdot 10^{-4})$; для M_4, M_5, M_6, M_7 $K_z = 0,9943$, $T_{відм} = 4187 год (\lambda = 2,38834 \cdot 10^{-4})$; для усіх КЗ ($C_1..C_8$) $K_z = 0,999$, $T_{відм} = 23976 год (\lambda = 4,17084 \cdot 10^{-5})$.

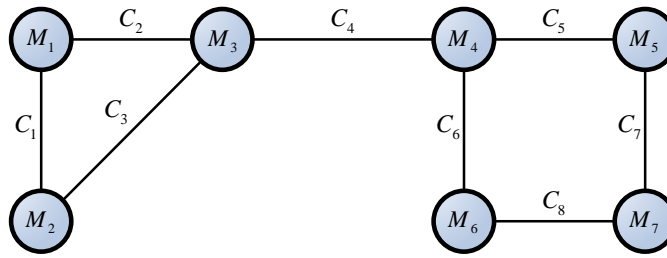


Рис. 2. Граф системи (приклад)

Розіб'ємо систему на три диз'юнктивних фрагменти.

Фрагмент 1: M_1, M_2, M_3 та всі КЗ, що сполучають їх між собою (C_1, C_2, C_3).

Фрагмент 2: M_4, M_5, M_6, M_7 та всі КЗ, що сполучають їх між собою (C_5, C_6, C_7, C_8).

Фрагмент 3: КЗ C_4 , що сполучає фрагмент 1 та фрагмент 2.

Нехай задано таку умову справності системи: у зв'язаній (цілісній) системі у кожному з фрагментів 1 і 2 повинні бути справними не менше двох серверних вузлів.

Згідно з формулами (14) і (15), розрахуємо показники надійності фрагмента 1 системи.

Для фрагмента 1 $K_{\phi_1} = 0,996378$.

Згідно з формулами (16) та (3), знайдемо множину граничних робочих станів фрагмента та середню тривалість напрацювання на відмову.

За формулою (16) отримаємо $\lambda_{\phi_1} = 1,52376 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{год}}$. Із формули (3): $T_{\text{відм}\phi_1} = 6563 \text{год}$.

Аналогічно проведемо розрахунок для фрагмента 2: $K_{\phi_2} = 0,9942554$,

$$\lambda_{\phi_2} = 2,42566 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{год}}, T_{\text{відм}\phi_2} = 4123 \text{год}.$$

Після розбиття системи на три диз'юнктивних фрагменти граф системи буде мати вигляд, представлений на рис. 3.

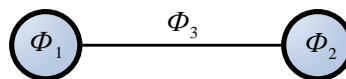


Рис. 3. Граф системи, представленої у вигляді фрагментів

Для справності системи необхідно, щоб усі фрагменти були справними. Тоді у системи буде єдиний справний стан. Провівши розрахунок за формулами (14), (15), (16) та (3), отримаємо:

$$K_s = 0,9896636, \lambda = 4,3665 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{год}}, T_{\text{відм}} = 2290 \text{год}.$$

6. Висновки

Запропоновано методику розрахунку показників надійності комплексу технічних засобів складних територіально розподілених ІУС, що ґрунтується на розбитті системи на фрагменти і характеризується відсутністю необхідності вирішення системи рівнянь.

Математичну модель ІУС отримано із використанням рівнянь Колмогорова. Для зменшення обсягу обчислень та збереження високої точності оцінки показників надійності необхідно провести

ієрархічне розбиття системи на підсистеми з виділенням логічних з точки зору стійкості до відмов фрагментів системи.

Згідно із запропонованою методикою, розроблено алгоритм та програмний продукт для розрахунку показників надійності КТЗ складних ІУС. Логіку розробленого алгоритму проілюстровано на прикладі розрахунку коефіцієнта готовності та середнього напрацювання на відмову конкретної системи.

Розроблена методика може бути застосована для оцінки надійності складних розподілених систем наряду з оцінкою надійності програмного забезпечення та впливу людського фактора на надійність системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 3524-97. Надійність техніки. Проектна оцінка надійності складних систем з урахуванням технічного і програмного забезпечення та оперативного персоналу. Основні положення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 36 с.
2. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. – К.: Держстандарт України, 1994. – 36 с.
3. Методология оценки надежности иерархических информационных систем: Тр. ИСА РАН / Г.П. Акимов, А.В. Соловьев. – Т. 23: Системный подход к управлению информацией. – М., 2006. – С. 18 – 47.
4. Федоров Ю.Н. Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка: Учебно-практическое пособие. – М.: Инфа-Инженерия, 2008. – 928 с.
5. Теория случайных процессов и её инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит. (Физико-математическая библиотека инженера), 1991. – 384 с.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2008