**УДК 004.942+621.396**

**Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, Р.С. Чопей,**
**А.В. Мащак, О.П. Шкілюк**
Національний університет "Львівська політехніка"

# ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛІ ЇХ ПОВЕДІНКИ



**Описано побудову моделі надійнісної поведінки програмно-апаратної системи у вигляді графа станів та переходів, яка враховує появу відмов та збоїв програмного забезпечення та апаратних засобів, їх наслідки, що призводять до простою, а також способи відновлення працездатності. За рахунок досягнутого ступеня адекватності запропонованої моделі підвищено достовірність розраховуваних показників надійності програмно-апаратної системи. Проведені дослідження показали різницю між значеннями функції готовності програмно-апаратної системи та ймовірності її перебування в стані простою, визначеними з урахуванням короткочасної та повної зупинок апаратних засобів.**

**Ключові слова: надійність, програмно-апаратна система, показники надійності.**

**B.Yu. Volochiy, L.D. Ozirkovskyi, R.S. Chopey,**
**A.V. Mashchak, O.P. Shkiliuk**
Lviv Polytechnic National University

# ESTIMATION THE RELIABILITY OF HARDWARE/SOFTWARE SYSTEMS BY USING MODELS OF THEIR BEHAVIOR



**Hardware/software systems provide flexible implementation of microprocessors, microcontrollers and various peripheral devices and supply the ability to perform almost any functional algorithm that can be simply modified or replaced. For reliability estimation of hardware/software systems we must take into account not only the loss of efficiency, which was caused by the hardware failures, but the abnormal functioning, that was caused by software failures. All these features of hardware/software systems must be considered in their models for reliability indexes estimation.**

**Development of mathematical models of hardware/software system begins with establishing the cause-and-effect relationships of its efficiency violations. Basing on these cause-and-effect relationships the structural-automatic model, which is formalized representation of structure and behavior of hardware/software system, was developed. This structural-automatic model and software module ASNA allows obtaining the analytical mathematical model of hardware/software system as graph of states and transitions. Development of structural-automatic model involves solving the following tasks: forming the vector of states, forming the set of formal parameters, defining the basic events and forming the tree of modification rules of vector's of states components.**

**Features of forming the vector of states are that the hardware state affects the software state and on the contrary, so the hardware/software system's state must be represented by two vector's of states components: one to display the hardware state and the other to display the software state. The set of formal parameters contains all constants and their values, which are used for constructing the mathematical model. Basing on the information of Crittercism, IBM,**

**Microsoft and Ballista OS Robustness Test Suite the intensities of hardware and software faults and failures were calculated. Other required initial data were obtained too. Also, 12 basic events, which can be occurred, and development of the tree of modification rules of vector's of states components were submitted in the model of hardware/software system. The specification of states and transitions was given and the graph of states and transitions was presented. From the developed model of the system's behavior we can clearly distinguish three types of states, which are related with faults and failures of hardware and of software separately as well as of hardware and software collectively.**

**Using the developed model the reliability indexes of non-reserved hardware/software system, which provides software restart when it hangs up, were researched. This mathematical model allows us to get standardized parameters of reliability and availability and other reliability indexes, which can be required by designers or engineers for comparison the competitive variants of hardware/software systems with different hardware and software configurations.**

**Key words: reliability, hardware/software system, reliability indexes.**

**Вступ.** Переважну більшість сучасних засобів обробки інформації реалізують як програмно-апаратні системи (ПАС). З одного боку, такий підхід забезпечує гнучку реалізацію структури засобів обробки інформації на основі широкого спектра мікропроцесорів, мікроконтролерів та різноманітних периферійних пристроїв, а з іншого боку – забезпечує можливість реалізації практично довільного алгоритму функціонування, який можна достатньо просто модифікувати чи замінити. Здебільшого модифікація передбачає лише оновлення чи заміну програмного забезпечення (ПЗ) без заміни апаратних засобів (АЗ).

Під час оцінювання надійності ПАС необхідно враховувати не тільки втрату працездатності, викликану виходом з ладу АЗ, а також порушення працездатності, які спричинені відмовами ПЗ. Причому несправності, пов'язані з ПЗ, у рази частіші, ніж вихід з ладу АЗ. Крім цього, надійність ПАС суттєво залежить від збоїв як АЗ, так і ПЗ, оскільки збої в АЗ можуть спричиняти збої та відмови в ПЗ і навпаки, а інтенсивність збоїв як АЗ, так і ПЗ, на 1–2 порядки вища, ніж інтенсивність їх відмов.

Всі ці особливості ПАС необхідно враховувати в моделях, на основі яких отримують показники їх надійності.

**Сучасні підходи до аналізу надійності програмно-апаратних систем.** Для оцінки надійності ПАС сьогодні застосовують ряд підходів та методик, які з певною достовірністю дозволяють визначити показники надійності.

У ряді праць [1, 2] ПЗ вважають безвідмовним, і розглядають тільки надійність АЗ, що суттєво завищує значення показників надійності ПАС. В монографіях [3, 4] стверджують, що надійність ПАС залежить як від надійності ПЗ, так і від надійності АЗ. Причому прийнято, що відмови АЗ не впливають на надійність ПЗ та навпаки, і ймовірність безвідмовної роботи ПАС $P_{HSS}(t)$ у цьому випадку визначається так:

$$P_{HSS}(t) = P_{HW}(t) \cdot P_{SW}(t) \tag{1}$$

де $P_{HW}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи АЗ, $P_{SW}(t)$ – ймовірність правильного виконання ПЗ.

У статті [5] під час оцінювання надійності ПАС враховуються особливості ПЗ на етапі експлуатації. Для цього застосовано модель, яка використовує припущення, що надійність ПЗ зростає стрибкоподібно після його оновлення. Це припущення ґрунтується на тому, що після кожного оновлення кількість дефектів зменшується. Однак навіть у випадку використання такої моделі надійності ПЗ ймовірність безвідмовної роботи ПАС буде заниженою, оскільки не враховується поведінка системи у разі появи відмов і збоїв АЗ та ПЗ.

У статті [6] модель поведінки ПАС будується на основі марковської моделі, з якої визначаються стани, пов'язані з надійністю ПЗ, і стани, які від надійності ПЗ не залежать. З першої

групи станів отримують ймовірність $P_{HW1}(t)$, а з другої – $P_{HW2}(t)$. Ймовірність безвідмовної роботи ПАС на основі моделі поведінки визначається згідно з (2), причому $P_{SW}(t)$ визначається згідно з [3]. Зазначимо, що сума ймовірностей $P_{HW1}(t)$ і $P_{HW2}(t)$ дорівнює одиниці.

$$P_{HSS}(t) = P_{HW1}(t) \cdot P_{SW} + P_{HW2}(t) \quad (2)$$

Однак така модель поведінки ПАС не враховує усіх різновидів збоїв і відмов ПЗ, наслідків, до яких вони призводять, та способів подолання цих наслідків (вивантаження ПЗ, перезавантаження ПЗ, переустановлення ПЗ).

Тому актуальним завданням є розроблення адекватної моделі поведінки ПАС, яка б дала змогу з високою достовірністю визначати показники її надійності.

**Розроблення моделі поведінки програмно-апаратної системи у вигляді графа станів та переходів.** В результаті аналізу інформаційних джерел [7 – 11] встановлено причинно-наслідкові зв'язки порушень працездатності ПАС, які наведено нижче.

Збій АЗ → Зупинка АЗ → Відновлення працездатності
Збій АЗ → Повна зупинка АЗ → Перезавантаження → Відновлення працездатності
Збій АЗ → Збій ПЗ → Зупинка АЗ → Відновлення працездатності
Збій АЗ → Збій ПЗ → Повна зупинка АЗ → Перезавантаження → Відновлення працездатності
Збій АЗ → Збій ПЗ → Зависання ПЗ → Перезавантаження → Відновлення працездатності
Збій АЗ → Збій ПЗ → Відмова ПЗ → Переустановлення ПЗ → Відновлення працездатності
Збій ПЗ → Зупинка АЗ → Відновлення працездатності
Збій ПЗ → Повна зупинка АЗ → Перезавантаження → Відновлення працездатності
Збій ПЗ → Зависання ПЗ → Перезавантаження → Відновлення працездатності
Збій ПЗ → Відмова ПЗ → Переустановлення ПЗ → Відновлення працездатності
Відмова АЗ → Ремонт → Відновлення працездатності
Відмова АЗ → Відмова ПЗ → Ремонт → Переустановлення ПЗ → Відновлення працездатності

На основі цих причинно-наслідкових зв'язків згідно з [12] здійснено розроблення структурно-автоматної моделі (САМ) – формалізованого опису структури та поведінки ПАС. Розроблена САМ є вхідними даними для програмного модуля ASNA [13], який автоматизовано генерує граф станів та переходів.

Розроблення САМ передбачає послідовне розв'язання таких задач: формування структури вектора станів, формування множини формальних параметрів, визначення базових подій та розроблення дерева правил модифікації компонент вектора стану.

**Формування вектора стану: вибір компонент, їх значень, встановлення початкових значень.** Оскільки стан АЗ впливає на стан ПЗ і навпаки, то стани ПАС необхідно представляти двома компонентами вектора станів: один для відображення станів АЗ, а інший для відображення станів ПЗ.

Під час функціонування АЗ слід враховувати, що при збоях ПЗ потрібно розрізняти два різновиди зупинки АЗ, а саме: зупинка АЗ та повна зупинка АЗ. Під зупинкою АЗ розуміють тимчасову непрацездатність АЗ. Працездатність ПАС у разі зупинки АЗ відновлюється шляхом вивантаження ПЗ, яке спричинило зупинку АЗ, з повторним його завантаженням та без повного перезавантаження ПАС. У разі повної зупинки АЗ відновлення працездатності ПАС можливе лише через її повне перезавантаження.

V1 – стан АЗ – 0 – АЗ працездатне
1 – АЗ тимчасово несправний після збою АЗ
2 – зупинка АЗ
3 – повна зупинка АЗ
4 – АЗ непрацездатне

V2 – стан ПЗ – 0 – ПЗ працездатне
1 – ПЗ тимчасово непрацездатне після збою АЗ або ПЗ
2 – ПЗ тимчасово непрацездатне в результаті зависання ПЗ
3 – ПЗ повністю непрацездатне і потребує переустановлення

**Розроблення дерева правил та модифікації компонент вектора станів.** Розроблення дерева правил модифікації компонент вектора стану згідно з [12] передбачає формалізований опис поведінки ПАС за різних видів порушення працездатності у вигляді базових подій, що можуть відбутися; умов та обставин, за яких ці події відбуваються; формул розрахунку інтенсивностей відмов та правил модифікації компонент вектора станів.

**Подія 1.** – "Збій АЗ" – ця подія може відбуватись за умови того, що АЗ і ПЗ є справним:
*умова 1* – АЗ справні і ПЗ справне (V1=0) AND (V2=0).

**Подія 2.** – "Зупинка АЗ" – ця подія може відбуватись за умови того, що відбувся збій АЗ або ПЗ:
*умова 1* – АЗ тимчасово несправний після збою АЗ (V1=1);
*обставина 1.1* – ПЗ працездатне (V2=0);
*обставини 1.2* – ПЗ тимчасово непрацездатне після збою АЗ або ПЗ (V2=1);
*умова 2* – АЗ справний, ПЗ тимчасово непрацездатне після збою АЗ або ПЗ (V1=0) AND (V2=1).

**Подія 3.** – "Відмова АЗ" – ця подія може відбуватись за умови справного АЗ:
*умова 1* – АЗ справний та ПЗ справне (V1=0) AND (V2=0).

**Подія 4.** – "Повна зупинка АЗ" – ця подія може відбутись за умови того, що відбувся збій АЗ або ПЗ:
*умова 1* – АЗ тимчасово несправний після збою АЗ (V1=1);
*обставина 1.1* – ПЗ працездатне (V2=0);
*обставини 1.2* – ПЗ тимчасово непрацездатне після збою АЗ або ПЗ (V2=1);
*умова 2* – АЗ справний, ПЗ тимчасово непрацездатне після збою АЗ або ПЗ (V1=0) AND (V2=1).

**Подія 5.** – "Збій ПЗ" – ця подія може відбутись за умови того, що ПЗ є працездатним:
*умова 1* – АЗ і ПЗ працездатні (V1=0) AND (V2=0);
*умова 2* – АЗ тимчасово несправний після збою АЗ (V1=1);
*обставина 2.1* – ПЗ працездатне (V2=0);
*обставина 2.2* – ПЗ тимчасово непрацездатне після збою АЗ або ПЗ (V2=1).

**Подія 6.** – "Зависання ПЗ" – ця подія може відбутись за умови того, що ПЗ є працездатним.
*умова 1* – Відбувся збій ПЗ (V2=1);
*обставина 1.1* – АЗ справний (V1=0);
*обставина 1.2* – АЗ тимчасово несправний після збою АЗ (V1=1).

**Подія 7.** – "Відмова ПЗ" – ця подія може відбутись за умови справного ПЗ;
*умова 1* – Відбулась відмова АЗ, ПЗ справне (V1=4) AND (V2 = 0);
*умова 2* – Відбувся збій ПЗ (V2=1);
*обставина 1.2* – АЗ тимчасово несправний після збою АЗ (V1=1);
*обставина 2.2* – АЗ справний (V1=0).

**Подія 8.** – "Перезавантаження ПЗ" – ця подія може відбутись за умови якщо АЗ перебуває у стані зупинки або ПЗ тимчасово непрацездатне в результаті зависання
*умова 1* – АЗ справний і перебуває у стані зупинки, ПЗ тимчасово непрацездатне в результаті зависання (V1 = 2) OR (V2 = 2)

**Подія 9.** – "Перезапуск ПАС" – ця подія може відбутись за умови працездатного АЗ:
*умова 1* – Відбулась повна зупинка АЗ (V1=3).

**Подія 10.** – "Переустановлення ПЗ" – ця подія може відбутись за умови непрацездатного ПЗ:

*умова 1* – Відбулася відмова ПЗ (V2=3);

*обставина 1.1* – АЗ справне (V1=0);

*обставина 1.2* – АЗ тимчасово несправний після збою АЗ (V1=1).

**Подія 11.** – "Завершення ремонту АЗ" – ця подія може відбутись за умови несправного АЗ:

*умова 1* – Відбулась відмова АЗ (V1=4).

**Подія 12.** – "Самоусунення збою АЗ" – ця подія може відбутись за умови справного АЗ:

*умова 1* – Відбувся збій АЗ, ПЗ справне (V1=1) AND (V2=0).

**Значення інтенсивностей подій.** За даними, опублікованими компанією Microsoft [7], імовірність апаратного збою через помилки в процесорі становить 1/190, через помилки в оперативній пам'яті – 1/1700, а через помилки у жорсткому диску – 1/270 відповідно. Також з цього дослідження видно, що подібні збої є повторними у 97 % випадків. Оскільки ці помилки є незалежними, інтенсивність збою АЗ визначатиметься за формулою (3)

$$\lambda_{ЗБ.АЗ} = \lambda_{ЦП} + \lambda_{ОЗП} + \lambda_{ЖД}, \tag{3}$$

де $\lambda_{ЦП}$ – інтенсивність збою, викликана збоями в роботі центрального процесора; $\lambda_{ОЗП}$ – інтенсивність збою, спричинена збоями в роботі оперативної пам'яті; $\lambda_{ЖД}$ – інтенсивність збою, викликана збоями в роботі жорсткого диска.

Інтенсивність збою визначається за такою формулою:

$$\lambda = \frac{n(t)}{N \cdot \Delta t}, \tag{4}$$

де $n(t)$ – кількість збоїв, які відбулись протягом часу дослідження; $N$ – загальна кількість пристроїв; $\Delta t$ – інтервал часу спостереження.

$$\lambda_{ЦП} = \frac{n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{5263}{1000000 \cdot 720} = 7{,}309 \cdot 10^{-6} [год^{-1}]. \tag{5}$$

$$\lambda_{ОЗП} = \frac{n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{589}{1000000 \cdot 720} = 8{,}18 \cdot 10^{-7} [год^{-1}]. \tag{6}$$

$$\lambda_{ЖД} = \frac{n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{3704}{1000000 \cdot 720} = 5{,}144 \cdot 10^{-6} [год^{-1}]. \tag{7}$$

Отже, інтенсивність збою апаратних засобів дорівнює:

$$\lambda_{ЗБ.АЗ} = \lambda_{ЦП} + \lambda_{ОЗП} + \lambda_{ЖД} = 7{,}309 \cdot 10^{-6} + 8{,}18 \cdot 10^{-7} + 5{,}144 \cdot 10^{-6} = 1{,}327 \cdot 10^{-5} [год^{-1}].$$

За даними дослідження Crittercism [10], імовірність збоїв програмного забезпечення збільшується за активнішого використання ресурсів. Імовірність збоїв операційних систем 0,007 ÷ 0,025, а з додатковими програмами дорівнює 0,044. Згідно з [7] імовірність збою програмного забезпечення, який виник внаслідок помилок у програмі, лежить у межах 0,023 ÷ 0,045.

$$P_{ЗБ.ПЗ} = 0{,}023 \div 0{,}045$$

Інтенсивність збою програмного забезпечення:

$$\lambda_{ЗБІЙ.ПЗ} = \frac{n(t)}{N\ \Delta t} = \frac{0{,}59386 ... 1{,}1619}{2582 \cdot 1000} = 2{,}99 \cdot 10^{-4} ... 4{,}5 \cdot 10^{-4} [год^{-1}] \tag{8}$$

В результаті дослідження компанією IBM [8] в тестовій сукупності ПАС було виявлено 5 тисяч збоїв, основними причинами яких були проходження альфа-частинок та нейтронів. З усієї сукупності збоїв 99,80 % були виявлені та виправлені засобами контролю та діагностики ПАС, а у 0,19 % випадках – призвели до зупинки програми, і лише в 0,01 % випадках збій спричинив втрату даних.

Інтенсивність самоусунення збою:

$$\lambda_{усун.} = \frac{n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{4990}{5000 \cdot 1000} = 9{,}98 \cdot 10^{-4} [год^{-1}] \tag{9}$$

Інтенсивність зупинки:

$$\lambda_{ЗУП.} = \frac{n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{9,5}{5000 \cdot 1000} = 1,9 \cdot 10^{-6} [год^{-1}] \quad (10)$$

Інтенсивність повної зупинки:

$$\lambda_{ПОВ.ЗУП} = \frac{n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{0,5}{5000 \cdot 1000} = 1 \cdot 10^{-7} [год^{-1}] \quad (11)$$

За даними проекту Ballista OS Robustness Test Suite [11] тестуванням п'ятнадцяти POSIX сумісних операційних систем протягом 5000 годин на тисячі комп'ютерах було визначено ймовірності відмови операційної системи до та після оновлення. Значення імовірності відмов лежить в межах 10…24 %.

Інтенсивність самоусунення збою:

$$\lambda_{САМОУС.ЗБ} = \frac{n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{100...240}{1000 \cdot 5000} = 2 \cdot 10^{-5}...4,8 \cdot 10^{-5} [год^{-1}] \quad (12)$$

За даними компанії Microsoft середній час зависання програмного забезпечення – 1–3 хвилини, середній час перезапуску програми – 61 секунду, а середній час перезавантаження системи 48 секунд.

На основі визначених подій розроблено дерево правил модифікації компонент вектора стану, яке є складовою САМ і подано у вигляді табл. 1.

*Таблиця 1*

**Дерево правил модифікації компонент вектора стану**

| Події | Умови та обставини | Формули розрахунку інтенсивностей базових подій | Правила модифікації компонент вектора станів |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1.Збій АЗ | (V1 = 0) AND (V2 = 0) | $l_{ЗБ.АЗ}$ | V1:=1 |
| 2. Зупинка АЗ | (V1 = 1) AND (V2 = 0) | $l_{ЗУП}$ | V1:=2 |
| | (V1 = 1) AND (V2 = 1) | $l_{ЗУП}$ | V1:=2 |
| | (V1 = 0) AND (V2 = 1) | $l_{ЗУП}$ | V1:=2 |
| 3. Відмова АЗ | (V1 = 0) AND (V2 = 0) | $l_{ВІДМ.АЗ}$ | V1:=4 |
| 4. Повна зупинка АЗ | (V1 = 1) AND (V2 = 0) | $l_{ПОВ.ЗУП}$ | V1:=3 |
| | (V1 = 1) AND (V2 = 1) | $l_{ПОВ.ЗУП}$ | V1:=3 |
| | (V1 = 0) AND (V2 = 1) | $l_{ПОВ.ЗУП}$ | V1:=3 |
| 5. Збій ПЗ | (V1 = 0) AND (V2 = 0) | $l_{ЗБІЙ.ПЗ}$ | V2:=1 |
| | (V1 = 1) AND (V2 = 0) | $l_{ЗБІЙ.ПЗ}$ | V2:=1 |
| | (V1 = 1) AND (V2 = 1) | $l_{ЗБІЙ.ПЗ}$ | V1:=0; V2:=1 |
| 6. Зависання ПЗ | (V2 = 1) AND (V1 = 0) | $1/t_{ЗАВ}$ | V2:=2 |
| | (V2 = 1) AND (V1 = 1) | $1/t_{ЗАВ}$ | V2:=2 |
| 7. Відмова ПЗ | (V1 = 4) AND (V2 = 0) | $l_{ВІДМ.ПЗ}$ | V2:=3 |
| | (V1 = 1) AND (V2 = 1) | $l_{ВІДМ.ПЗ}$ | V2:=3 |
| | (V1 = 0) AND (V2 = 1) | $l_{ВІДМ.ПЗ}$ | V2:=3 |
| 8. Перезавантаження ПЗ | (V1 = 2) OR (V2 = 2) | $1/t_{ПЕРЕЗ.ПЗ.}$ | V1:=0; V2:=0 |

*Продовження табл. 1*

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| 9. Перезапуск ПАС | (V1 = 3) | $1/t_{ПЕРЕЗ.ПАС}$ | V1:=0; V2:=0 |
| 10. Переустановлення ПЗ | (V1 = 0) AND (V2 = 3) | $1/t_{ПЕРЕУСТ}$ | V2:=0 |
| | (V1 = 1) AND (V2 = 3) | $1/t_{ПЕРЕУСТ}$ | V1:=0; V2:=0 |
| 11. Завершення ремонту АЗ | (V1 = 4) | $1/t_{РЕМ}$ | V1:=0 |
| 12. Самоусунення збою АЗ | (V1 = 1) AND (V2 = 0) | $l_{усун.}$ | V1:=0 |

Побудована САМ вводиться у програмний модуль ASNA. В результаті сформовано граф станів та переходів ПАС, представлений на рис. 1, специфікацію станів подано у табл. 2, а специфікацію переходів – у табл. 3.

*Таблиця 2*

**Специфікація станів**

| № стану | Опис стану |
|---|---|
| 1 | АЗ та ПЗ працездатні |
| 2 | АЗ тимчасово несправний після збою АЗ, ПЗ справне |
| 3 | Зупинка АЗ, ПЗ працездатне |
| 4 | АЗ непрацездатний, ПЗ працездатне |
| 5 | Повна зупинка АЗ, ПЗ працездатне |
| 6 | ПЗ тимчасово непрацездатне після збою ПЗ, АЗ справний |
| 7 | АЗ тимчасово несправний після збою АЗ, ПЗ тимчасово непрацездатне після збою АЗ |
| 8 | справний АЗ, ПЗ тимчасово непрацездатне в результаті зависання ПЗ |
| 9 | АЗ тимчасово несправний після збою АЗ, ПЗ тимчасово непрацездатне в результаті зависання ПЗ |
| 10 | АЗ тимчасово несправний після збою АЗ, ПЗ повністю непрацездатне і потребує переустановлення |
| 11 | АЗ непрацездатний, ПЗ повністю непрацездатне і потребує переустановлення |
| 12 | АЗ працездатний, ПЗ повністю непрацездатне і потребує переустановлення |
| 13 | Зупинка АЗ, ПЗ тимчасово непрацездатне після збою ПЗ |
| 14 | Повна зупинка АЗ, ПЗ тимчасово непрацездатне після збою ПЗ |

*Таблиця 3*

**Специфікація переходів**

| № переходу | Зі стану | В стан | Інтенсивність переходу | Опис подій |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | 2 | $\lambda_{зб.АЗ}$ | Відбувся збій АЗ |
| 2 | 2 | 1 | $\lambda_{ус.зб.АЗ}$ | Збій АЗ самоусунувся |
| 3 | 1 | 4 | $\lambda_{АЗ}$ | Відбулась відмова АЗ |
| 4 | 4 | 1 | $1/ t_{рем.АЗ}$ | Завершено ремонт АЗ |
| 5 | 1 | 6 | $\lambda_{зб.ПЗ}$ | Відбувся збій ПЗ |
| 6 | 3 | 1 | $1/ t_{перез.ПЗ}$ | Відбулося перезавантаження ПЗ |
| 7 | 2 | 3 | $\lambda_{зуп}$ | Відбулась зупинка АЗ |
| 8 | 5 | 1 | $1/t_{перез.ПАС}$ | Перезапуск ПАС |
| 9 | 2 | 5 | $\lambda_{пов.зуп}$ | Відбулась повна зупинка АЗ |
| 10 | 2 | 7 | $\lambda_{зб.ПЗ}$ | Відбувся збій ПЗ |
| 11 | 4 | 11 | $\lambda_{ПЗ}$ | Відбулась відмова ПЗ |
| 12 | 7 | 6 | $\lambda_{ус.зб.АЗ}$ | Збій АЗ самоусунувся |
| 13 | 10 | 1 | $1/ t_{переуст.ПЗ}$ | Відбулось переустановлення ПЗ |
| 14 | 9 | 1 | $1/ t_{перез.ПЗ}$ | Відбулося перезавантаження ПЗ |

*Продовження табл. 3*

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| 15 | 7 | 9 | $\lambda_{\text{завс.ПЗ}}$ | Відбулось зависання ПЗ |
| 16 | 7 | 10 | $\lambda_{\text{ПЗ}}$ | Відбулась відмова ПЗ |
| 17 | 7 | 14 | $\lambda_{\text{пов.зуп}}$ | Відбулась повна зупинка АЗ |
| 18 | 7 | 13 | $\lambda_{\text{зуп}}$ | Відбулась зупинка АЗ |
| 19 | 11 | 12 | $1/t_{\text{рем.АЗ}}$ | Завершено ремонт АЗ |
| 20 | 6 | 13 | $\lambda_{\text{зуп}}$ | Відбулась зупинка АЗ |
| 21 | 13 | 1 | $1/t_{\text{перез.ПЗ}}$ | Відбулося перезавантаження ПЗ |
| 22 | 6 | 14 | $\lambda_{\text{пов.зуп}}$ | Відбулась повна зупинка АЗ |
| 23 | 14 | 1 | $1/t_{\text{перез.ПАС}}$ | Перезапуск ПАС |
| 24 | 6 | 8 | $\lambda_{\text{завс.ПЗ}}$ | Відбулось зависання ПЗ |
| 25 | 8 | 1 | $1/t_{\text{перез.ПЗ}}$ | Відбулося перезавантаження ПЗ |
| 26 | 6 | 12 | $\lambda_{\text{ПЗ}}$ | Відбулась відмова ПЗ |
| 27 | 12 | 1 | $1/t_{\text{переуст}}$ | Відбулось переустановлення ПЗ |

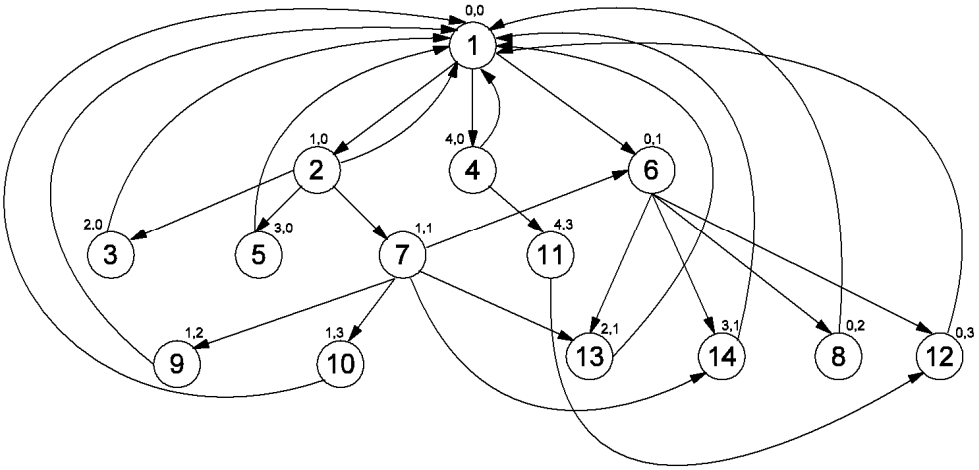


*Рис. 1. Надійнісна модель ПАС у вигляді графа станів та переходів*

З отриманої моделі поведінки системи можна чітко розрізнити три види станів, які пов'язані зі збоями та відмовами: апаратної частини (стани: 2, 3, 4, 5), програмної частини (стани 6, 8, 12), а також апаратної та програмної частин разом (стани 7, 9, 10, 11, 13, 14). Також з цієї моделі видно, що самостійно можуть виникати збої АЗ та ПЗ, а також відмови АЗ, а всі інші стани є наслідками цих подій.

**Дослідження показників ефективності ПАС.** За допомогою розробленої моделі проведено дослідження показників надійності нерезервованої ПАС, у якій передбачено перезапуск ПЗ у разі його зависання. Розроблена модель поведінки дає змогу отримати як загальноприйняті характеристики надійності (залежність ймовірності безвідмовної роботи від тривалості експлуатації, функція готовності), так і характеристики та показники надійності, необхідні проектанту для порівняння конкурентних варіантів ПАС з різними апаратними та програмними конфігураціями (функція готовності з урахуванням зупинки АЗ при зависанні ПЗ, ймовірність зупинки, ймовірність простою або повної зупинки). Формуються названі показники надійності підсумуванням ймовірностей перебування у певних станах (див. табл. 2).

Під час формування показників надійності ПАС прийнято допущення, що тривалість перебування у кожному стані розподілена експоненційно, оскільки на системотехнічному етапі проектування даних про реальні закони розподілу може не бути. Якщо у проектанта є дані про реальні закони розподілу тривалості перебування у всіх чи окремих станах, під час побудови САМ слід скористатися методикою, викладеною в [13].

Результати дослідження показників ефективності ПАС наведено на рис. 2–4. З графіка 3 видно, що неврахування зупинок ПАС у разі зависання ПЗ завищує значення функції готовності (криві 2 і 3 рис. 3).

Також на основі моделі поведінки було визначено залежності ймовірності перебування ПАС у стані простою. На рис. 4 зображено залежність ймовірності перебування у стані зупинки АЗ (крива 1) та залежність ймовірності перебування у стані повної зупинки АЗ (крива 2) від тривалості експлуатації.

Максимальне значення ймовірності зупинки (короткочасної) на порядок більше, ніж максимальне значення ймовірності повної зупинки АЗ в результаті зависання чи виходу з ладу ПЗ, що відповідає експериментальним даним, які представлені в роботах [7–11].

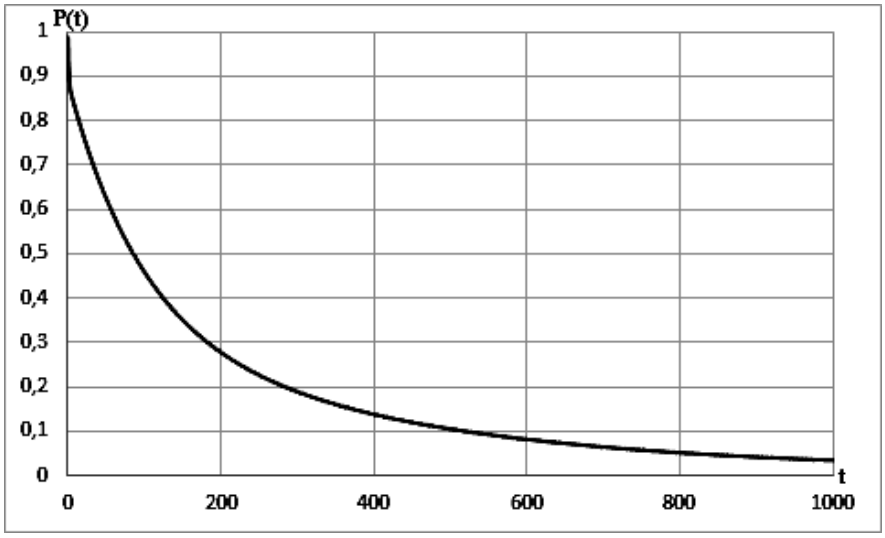


*Рис. 2. Залежність ймовірності безвідмовної роботи ПАС від тривалості експлуатації*

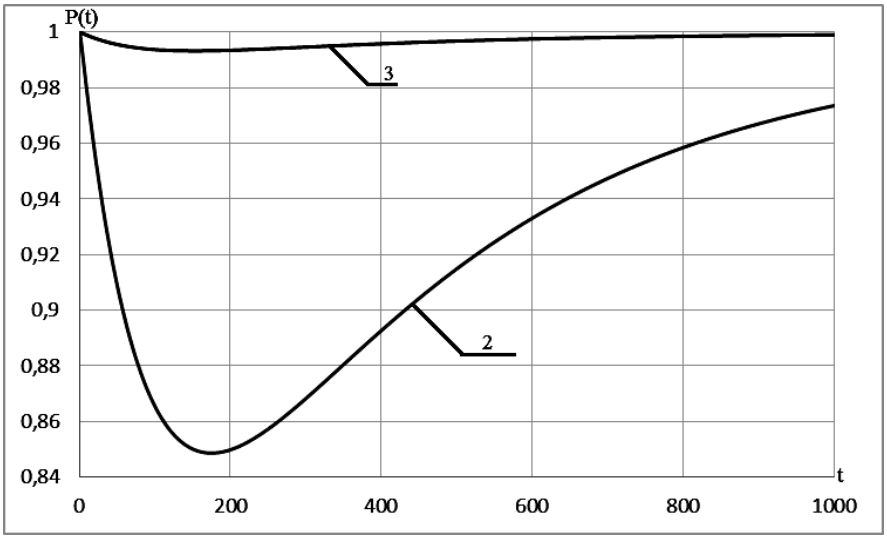


*Рис. 3. Залежність функції готовності від тривалості експлуатації:*
*2 – функція готовності ПАС з урахуванням обох видів зупинки АЗ,*
*3 – функція готовності ПАС з урахуванням лише повної зупинки АЗ*

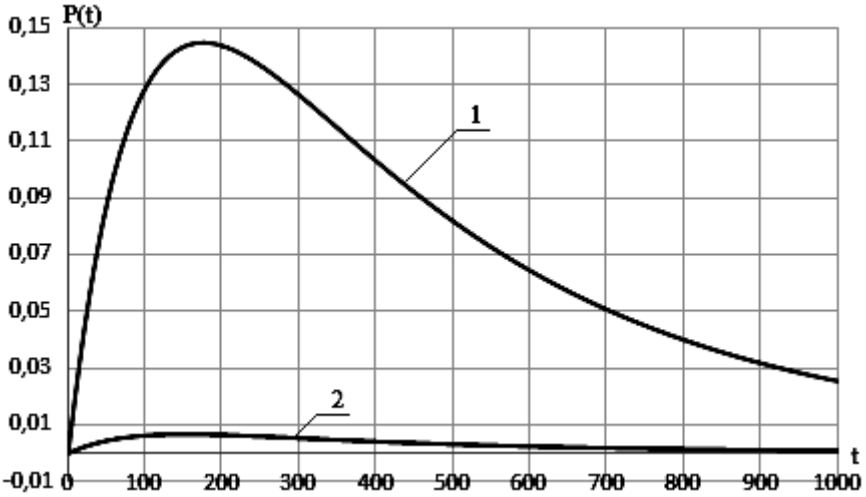


*Рис. 4. Залежність ймовірності простою ПАС від тривалості експлуатації: 1 – простій, обумовлений зупинкою АЗ, 2 – простій, обумовлений повною зупинкою АЗ*

**Висновки.** Запропонована модель, на відміну від наявних, дає змогу адекватно враховувати поведінку ПАС у разі появи збоїв і відмов як АЗ, так і ПЗ, та їх наслідки, що підвищує достовірність показників надійності. Крім загальноприйнятих, розроблена модель дозволяє отримувати такі показники ПАС, як ймовірність повної зупинки, ймовірність короткочасної зупинки та ймовірності простою ПАС. При цьому простій ПАС виникає як у результаті порушень працездатності АЗ і ПЗ, так і під час її відновлення шляхом перезавантаження чи переустановлення ПЗ.

Перспективним вважається вдосконалення моделі поведінки для дослідження показників надійності відмовостійких ПАС, які застосовуються в системах відповідального призначення, оскільки в таких системах критичним є не тільки вихід з ладу, але й короткочасні простої під час зависання ПЗ чи його перезавантаження.

*1. Половко А.М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С.В. Гуров. – Петербург.: Изд-во БВХ-Петербург, 2006. – 702 с. 2. Черкесов Г.Н. Надежность апаратно-программных комплексов: учеб. Пособие / Геннадий Черкесов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с. – ISBN 5-469-00102-4. 3. Pham H. Handbook of Reliability Engineering/ H. Pham – London.: British Library Cataloguing in Publication Data. 2003. – 696 p. 4. Иыуду К.А. Математическое модели отказоустойчивых вычислительных систем/К.А. Иыуду, С.А. Кривощеков. – М.: Изд-во МАИ, 1989. – 144 с. 5. Волочій Б.Ю. Методика визначення показників надійності відмовостійких програмно-апаратних радіоелектронних систем / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський, Т.І. Панський, О.В. Муляк // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2013. – № 55. – С. 71–79. 6. Озірковський Л.Д. Модель поведінки програмно-апаратних електронних систем / Л. Д. Озірковський, Т. І. Панський // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" – 2013 – № 764 – С. 36–43. 7. Nightingale E. Douceur J. Orgovan V. An Empirical analysis of hardware failures on million consumer PCs. 8. Осипенко П. Одиночные сбои – вызов для современных микропроцессоров. 9. Software reliability [Електронний ресурс]. – Режим доступу: \www/ URL: http://srel.ee.duke.edu/sw_ft/node3.html 10. Crittercism [Електронний ресурс]. – Режим доступу: \www/ URL: http://pages.crittercism.com/rs/ crittercism/images/crittercism-mobile-benchmarks.pdf 11. Electrical & Computer Engineering [Електронний ресурс] Режим доступу: \www/ URL: http://users.ece.cmu.edu/~koopman/ des_s99/sw_reliability/ 12. Волочій Б.Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем /Б.Ю. Волочій. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2004. – 220 с. 13. Бобало Ю. Я. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: монографія / Ю. Я. Бобало, Б. Ю. Волочій, О. Ю. Лозинський, Б. А. Мандзій, Л. Д. Озірковський, Д. В. Федасюк, С. В. Щербовських, В. С. Яковина. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 300 с.*