

УДК 681.3.06

В.П. Зверев<sup>1</sup>, С.Є. Гнатюк<sup>2</sup><sup>1</sup> Державна служба спеціального зв'язку та захисту інформації України, Київ<sup>2</sup> Державний НДІ спеціального зв'язку та захисту інформації, Київ

## МОДЕЛЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ

Запропоновано модель оцінки надійності програмних засобів у період нормальної експлуатації програмно-керованих засобів зв'язку. Дана модель відрізняється від відомих використанням нових аналітичних виразів кількісної оцінки значень показників надійності, доступністю вихідних даних, реальними припущеннями та обмеженнями на використання, повною автоматизацією операцій згідно нового алгоритму реалізації, точністю оцінки і прогнозування значень показників надійності програмних засобів.

**Ключові слова:** програмні засоби, комп'ютерна система, показники надійності, точність оцінки.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Перспективним напрямком розвитку систем зв'язку є перехід на цифрову обробку сигналів із заміною аналогових засобів зв'язку дискретними. При цьому надійність засобів зв'язку визначається не тільки апаратними (АЗ) але й програмними засобами (ПЗ). Відомі моделі надійності ПЗ дозволяють оцінити і прогнозувати кількість помилок в процесі тестових досліджень [1 – 7]. Внаслідок обмеженого часу досліджень до моменту введення в експлуатацію виробів їх ПЗ може мати деяку кількість помилок, невиявлених в процесі тестових досліджень.

**Мета роботи** – створення моделі оцінки надійності ПЗ в період нормальної експлуатації програмно-керованих засобів зв'язку (ПКЗЗ), які представляють собою комп'ютерну систему (КС).

### Основна частина

При невідомому законі розподілу випадкової величини і наявності даних про відмови ПЗ під час експлуатації КС використовують моделі надійності [1 – 8]: аналітичні – розрахунок кількісних показників надійності за статистичними даними потоку відмов за час експлуатації; динамічні – поява відмов ПЗ як неперервний часовий процес із фіксацією моменту кожної відмови; статичні – фіксація загального числа відмов ПЗ за визначений час.

Модель надійності ПЗ комп'ютерних систем і ПКЗЗ – сукупність аналітичних виразів, що описують функціональні залежності показників надійності від часу і дозволяють отримати їх кількісну оцінку [9].

Структура математичної моделі надійності ПЗ приведена в [8].

Модель призначена для кількісної оцінки і прогнозування значень показників надійності ПЗ за результатами обробки статистичних даних про від-

мови за деякий період часу. Точність кількісної оцінки і прогнозування значень показників надійності спеціальних КС в значній мірі визначається моделлю надійності ПЗ.

В табл.1 за результатами аналізу [1-7] приведена порівняльна характеристика моделей надійності ПЗ, які найбільш використовуються, розміщених в порядку зростання значень середнього квадратичного відхилення (СКВ) прогнозованого числа помилок ПЗ від істинного за заданий період експлуатації КС:

1. Модель перехідного процесу.
2. Експоненціальна модель Мусси.
3. Проста експоненціальна модель.
4. Модель Желінські-Моранді.
5. Модель Дюена.
6. Логарифмічна модель Мусси-Окумото.
7. Модель S-подібного зростання надійності з перегинами.
8. Модель S-подібного зростання надійності.
9. Модель Вейбулла.
10. Модель Шика-Волвертона.
11. Геометрична модель Моранді.

Із аналізу даних табл. 1 випливає, що найбільш доцільно використовувати моделі із марковським процесом виявлення помилок ПЗ і експоненціальним законом розподілу інтенсивності відмов, які мають найменше значення СКВ розрахункових результатів від експериментальних даних та відносяться до класу аналітичних і оснований на розрахунку кількісних значень показників надійності ПЗ по статистичним даним потоку відмов за час експлуатації КС.

Згідно прийнятої моделі надійності ПЗ, число відмов змінюється за експоненціальним законом

$$N_m = ae^{-mb},$$

де значення коефіцієнтів визначаються за результатами підконтрольної експлуатації спеціальної комп'ютерної системи після рішення системи рівнянь

Таблиця 1

Порівняльна характеристика моделей надійності програмного забезпечення

Характеристика	Можливі значення	Моделі надійності ПЗ										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Процес виявлення помилок	Марківський	+	+	+	+					+	+	+
	Пуасонівський					+	+					
	Пуасонівський неоднорідний							+	+			
Закон розподілу інтенсивності відмов	Експоненціальний	+	+	+	+			+	+		+	
	Геометрична прогресія											+
	Вейбулла									+		
	Пуассона					+						
Припущення при використанні моделі	Логарифмічний						+					
	Швидкість виявлення помилок залежить від їх кількості	+	+	+	+			+			+	
	Помилки усувають до наступного повернення в систему	+						+				
	При усуненні помилок нові не вносяться	+			+			+	+			
	Усі помилки рівно ймовірні і незалежні				+	+			+			
	Вплив усіх помилок на роботу ПЗ рівнозначний				+	+						
	Інтенсивність виявлення помилок постійна		+	+	+							
	Інтенсивність відмов лінійно зростає											+
	При усуненні помилок можлива поява нових		+	+								
	Помилки можуть бути взаємопов'язані		+	+					+			
	Облік часу роботи, простою і ремонту		+									
	Загальне число помилок не обмежене											+
Прояв помилок не рівноймовірний						+					+	
Виявлення помилок не залежить від їх кількості											+	
Інтенсивність відмов зростає, потім зменшується									+			

$$\begin{cases} A_1 = a e^{-b} ; \\ A_n = a e^{-nb} , \end{cases}$$

звідки отримуємо:

$$b = \frac{\ln(A_n/A_1)}{1-n} ;$$

$$a = A_1 \exp \left[ \frac{\ln(A_n/A_1)}{1-n} \right] = A_1 (A_n/A_1)^{1/(1-n)} .$$

Тоді кількість відмов ПЗ за місяць  $m$  дорівнює

$$\begin{aligned} N_m &= A_1 \exp \left[ \frac{m \ln(A_n/A_1)}{1-n} \right] = \\ &= A_1 (A_n/A_1)^{(1-m)/(1-n)} . \end{aligned}$$

Прогнозоване число помилок у ПЗ, яке виявляється за період  $T$ , складає

$$N = \sum_{m=1}^T N_m .$$

Загальний час використання ПЗ на  $R$  робочих місяцях за місяць  $m$  дорівнює

$$\tau_m = \sum_{r=1}^R t_{rm} .$$

Напрацювання на відмову ПЗ по результатам роботи за місяць  $m$

$$T_{nm} = \tau_m / N_m .$$

Прогноз значень ймовірностей безвідмовної роботи за місяць  $m$  ПЗ

$$P_{nm} = \exp(-\phi_m/T_{nm}) = \exp(-N_m) .$$

Сутність моделі полягає в отриманні кількісної оцінки показників надійності ПКЗЗ при заданих

обмеженнях і припущеннях на базі використання нових функціональних залежностей, які відображають зміну значень показників від часу.

Вихідні дані для використання залежать від порядку обліку відмов ПЗ.

У випадку щомісячного підведення підсумків використовується статична модель надійності ПЗ з вихідними даними:  $n$  – число місяців підконтрольної експлуатації ПЗ;  $K_m$  – число відмов ПЗ за місяць  $m$ ;  $T$  – період прогнозування показників надійності ПЗ.

При фіксації відмов ПЗ безпосередньо після їх виникнення використовується динамічна модель надійності ПЗ з вихідними даними:  $K_{cm}$  – сумарне число зафіксованих відмов ПЗ за момент часу  $m$ .

Обмеження на використання моделі:

умови експлуатації ПКЗЗ за час отримання початкових даних і на період прогнозування постійні;

ПЗ функціонує у середовищі близькому до реальних умов експлуатації;

розглядається період нормальної експлуатації АЗ, коли значення параметру потоку відмов і напрацювання на відмову постійні.

Припущення при використанні моделей:

помилка ПЗ усувається до наступного звернення в систему;

помилка ПЗ виявлена на одному робочому місці, усувається на усіх робочих місцях;

інтенсивність виявлення помилок пропорційна їх поточному числу в ПЗ;

всі помилки ПЗ однаково ймовірні і їх поява незалежна одна від іншої;

проява кожної помилки веде до порушення правильності функціонування ПЗ;

час до наступної відмови ПЗ розподілений експоненціально;

помилки ПЗ після виявлення усуваються без внесення нових;

інтенсивність виявлення помилок постійна в інтервалі між 2 суміжними моментами появи помилок.

Математичний апарат моделі базується на використанні методів теорії надійності [9, 4-6] і теорії ймовірностей [10]. Основні аналітичні вирази і функціональні залежності запропонованих статичної та динамічної моделей зведені в табл. 2, де додатково позначено:  $A_1, A_n$  – апроксимація даних про відмови ПЗ за перший і останній місяці підконтрольної експлуатації;  $N_{ci}, N_{cj}$  – сумарна кількість відмов ПЗ за час  $i$  та  $j$  із початку експлуатації ( $1 < i < j < n$ ).

В результаті аналізу даних підконтрольної експлуатації ПКЗЗ за  $n$  місяців і припущення про експоненціальний закон зміни числа відмов ПЗ від часу з використанням методу найменших квадратів [10] виконується апроксимація залежності експериментальних даних від часу, після чого обчислюється значення коефіцієнтів аналітичної моделі надійності ПЗ.

На рис. 1 представлена блок-схема укрупненого алгоритму розрахунку показників надійності ПЗ по аналітичній моделі, що складається із операцій:

визначення порядку обліку відмов ПЗ (щомісяця або по мірі виникнення);

вибір динамічної або статичної моделі надійності ПЗ;

ввід вихідних даних по результатам підконтрольної експлуатації ПЗ за  $n$  місяців;

апроксимація статистичних даних про відмови ПЗ із використанням методу найменших квадратів одним із способів, що розглянуті в [10];

розрахунок кількісних оцінок значень показників надійності ПЗ за  $n$  місяців і прогнозування на період  $T$  відповідно до аналітичних виразів табл. 2;

оцінка точності обчислення кількості відмов ПЗ за  $n$  місяців по моделі надійності в порівнянні з дослідними даними по СКВ результатів ( $\sigma$ );

вивід результатів оцінки і прогнозування значень показників надійності ПЗ за період  $T$  у вигляді таблиць і їх функціональних залежностей від часу.

Приклади використання моделей надійності ПЗ на основі аналізу і обробки реальних статистичних даних щодо експлуатації КС приведені в [1 – 9].

Таблиця 2

Розрахунок кількісних оцінок значень показників надійності ПЗ

Показник надійності ПЗ	Вид моделі надійності ПЗ		
	Статична		Динамічна
Значення коефіцієнтів моделі за результатами апроксимації даних про відмови ПЗ	$b = \ln(A_n/A_1)/(1-n)$ $a = A_1(A_n/A_1)^{1/(1-n)}$	Розрахунок по алгоритму за критерієм мінімуму середньоквадратичного відхилення від експериментальних даних	$b = \frac{\ln(N_{cj}/N_{ci})}{(i-j)/T - \ln(i/T) + \ln(j/T)}$ $a = N_{ci} \sqrt{\left[ (i/T)^b \exp(-ib/T) \right]}$ $0 < i < j \leq T$
Кількість відмов ПЗ за місяць $m$ ( $N_m$ )	$a \exp(-mb)$	$A_1 (A_n/A_1)^{(1-m)/(1-n)}$	$\frac{a}{T^b} \cdot \frac{m^b - (m-1)^b e^{b/T}}{e^{mb/T}}$
Сумарна кількість відмов ПЗ за $T$ місяців ( $NT$ )	$\frac{a(e^{bT} - 1)}{e^{bT}(e^b - 1)}$	$\frac{A_1 \left[ (A_n/A_1)^{T/(1-n)} - 1 \right]}{(A_n/A_1)^{(T-1)/(n-1)} \times \left[ (A_n/A_1)^{1/(1-n)} - 1 \right]}$	$a \exp(-b)$
Ймовірність безвідмовної роботи ПЗ за місяць $m$ ( $P_{nm}$ )	$\exp(-ae^{-mb})$	$\exp \left[ -A_1 (A_n/A_1)^{\frac{m-1}{n-1}} \right]$	$\exp \left[ -\frac{a \left( m^b - (m-1)^b e^{b/T} \right)}{T^b e^{mb/T}} \right]$
Інтенсивність потоку відмов ПЗ за місяць $m$ ( $\lambda_m$ )	$-ab(A_n/A_1)^m$	$\frac{A_1 (A_n/A_1)^{\frac{m-1}{n-1}} \ln(A_n/A_1)}{1-n}$	$\frac{a \left[ m^b e^{-b/T} - (m-1)^b \right]}{T^b \exp \left[ b(m-1)/T \right]}$
Напрацювання ПЗ на відмову за місяць $m$ ( $T_{nm}$ )	$-(A_n/A_1)^{-m}/ab$	$\frac{1-n}{A_1 (A_n/A_1)^{\frac{m-1}{n-1}} \ln(A_n/A_1)}$	$\frac{T^b \exp \left[ b(m-1)/T \right]}{a \left[ m^b e^{-b/T} - (m-1)^b \right]}$
Середньоквадратичне відхилення результатів прогнозування $N_m$ від даних про відмови ПЗ за $n$ місяців ( $\sigma$ )	$\sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (ae^{-mb} - K_m)^2}{n}}$	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \left( A_1 \left( \frac{A_n}{A_1} \right)^{\frac{1-m}{1-n}} - K_m \right)^2}$	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \left( \frac{K_{cm} - a \times \left[ m^b - (m-1)^b e^{b/T} \right]}{T^b e^{mb/T}} \right)^2}$

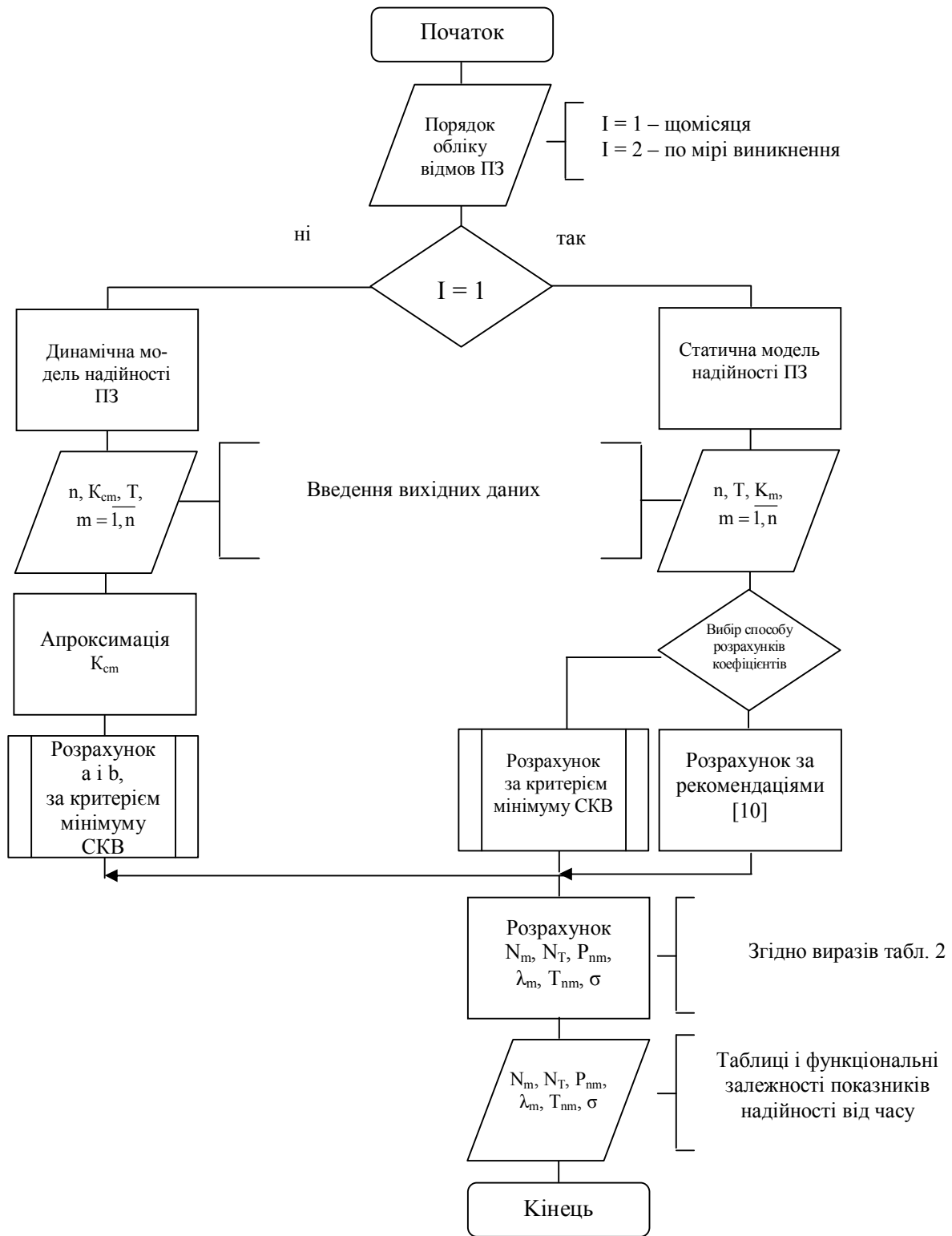


Рис. 1. Блок-схема укрупненого алгоритму розрахунку показників надійності програмних засобів по аналітичній моделі

Приклад реалізації моделі розглянемо із використанням реальних початкових даних щодо експлуатації спеціальної КС із робіт [3, 8]:  $R=5$ ,  $T_a=5000$  год.,  $T=12$  міс.,  $t_{rm}=192$  год.,  $K_1=8$ ,  $K_2=6$ ,  $K_3=6$ ,  $K_4=4$ ,  $n=4$ . У результаті апроксимації початкових даних за  $n=4$  місяці дослідної експлуатації отримуюємо  $A_1=8$ ;  $A_2=6,7$ ;  $A_3=5,5$ ;  $A_4=4,5$  (рис. 2).

Результати розрахунків приведені на рис. 3 – 5. Їх аналіз показує, що значення числа відмов ПЗ зменшується протягом року експлуатації (рис. 3), при цьому прогнозоване число помилок ПЗ, які виявлені за 12 місяців  $N_{12}=41,88$ , що всього на 0,28% відрізняється від істинного значення ( $N_i=42$ ).

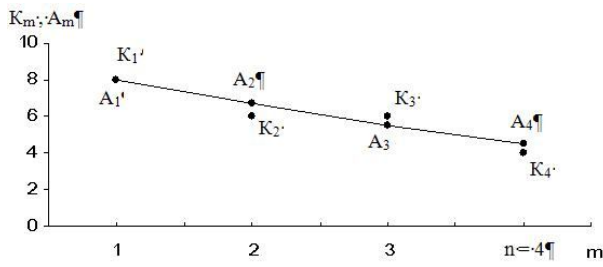


Рис. 2. Апроксимація даних про відмови ПЗ

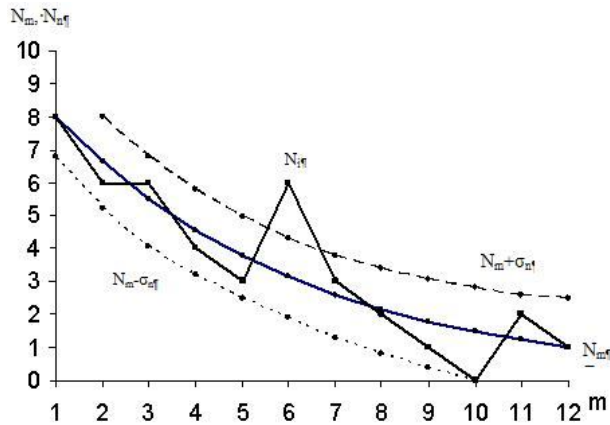


Рис. 3. Залежності прогнозованого ( $N_m$ ) і істинного ( $N_i$ ) числа відмов за рік експлуатації програмних засобів від часу користування комп'ютерною системою

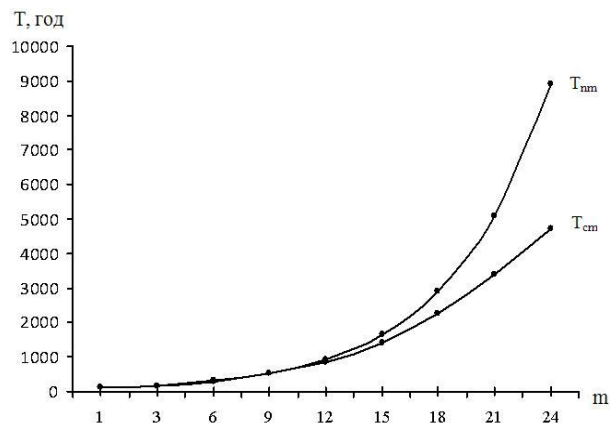


Рис. 4. Залежності напрацювання на відмову програмного забезпечення ( $T_{nm}$ ) і системи в цілому ( $T_{cm}$ ) від часу експлуатації

Напрацювання на відмову ПЗ неперервно зростає (рис. 4) внаслідок виявлення і усунення помилок в ПЗ усіх комп'ютерів системи, а значення напрацювання на відмову системи ( $T_{cm}$ ) наближається до напрацювання на відмову АЗ ( $T_a$ ) в період нормальної експлуатації. Тому, не дивлячись на те, що ймовірність безвідмовної роботи АЗ ( $P_{am}$ ) поступово зменшується, аналогічні показники ПЗ ( $P_{nm}$ ) і системи в цілому ( $P_{cm}$ ) зростають (рис.5) до моменту усунення усіх помилок ПЗ, після чого надійність системи визначається тільки АЗ:

$$N_m = 0; P_{nm} = 1; T_{cm} = T_a; P_{cm} = P_{am}.$$

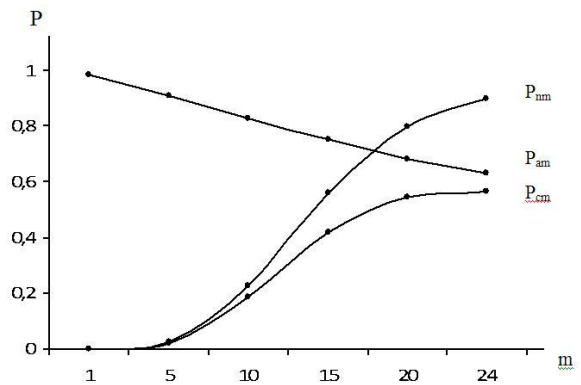


Рис. 5. Залежності ймовірностей безвідмовної роботи апаратних засобів ( $P_{am}$ ), програмних засобів ( $P_{nm}$ ) і системи в цілому ( $P_{cm}$ ) від часу експлуатації

Для прикладу, який розглядається, в область  $N_m \pm \sigma_n$  попадає 91,7% експериментальних даних (рис. 3), що свідчить про достатньо високу точність прогнозу числа відмов ПЗ за  $n$  місяців експлуатації КС.

Адекватність моделі підтверджується за критерієм узгодження  $\chi^2$  Пірсона [13].

За виразом

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(N_m - K_m)^2}{N_m}$$

знаходяться значення цього критерію для запропонованих моделей.

Дальше передбачаючи нормальний закон розподілу  $K_m$  для  $n = 12$  знаходиться число степенів свободи  $r = 9$  і по табличним значенням [10] визначається ймовірність того, що величина розподілена по закону  $\chi^2$  перевершить це значення.

При використанні статичної моделі по вхідним даним прикладу [3, 11] отримуємо  $\chi^2 = 5,57$  і з ймовірністю, рівною 0,78 гіпотезу про відповідність моделі досліджуваному процесу зміни числа відмов ПЗ за місяць експлуатації КС можна вважати правдоподібною.

При використанні динамічної моделі по вхідним даним того ж прикладу при перерахунку числа відмов ПЗ з початку експлуатації КС отримуємо  $\chi^2 = 3,25$  і з ймовірністю, рівною 0,94 гіпотезу про відповідність моделі досліджуваному процесу накопичення сумарної кількості відмов ПЗ з початку експлуатації КС можна вважати правдоподібною.

Ефект від використання запропонованої моделі в порівнянні з відомими [1-9] полягає в підвищенні точності кількісної оцінки і прогнозування значень показників надійності ПЗ:

розрахункове значення числа відмов ПЗ за  $T$  місяців експлуатації КС відрізняється від істинного всього на 1,5-3,1 %;

помилка в оцінці числа відмов ПЗ за місяць експлуатації КС не перевищує 0,6%;

зменшення значення СКВ результатів обчислень від експериментальних даних за  $n$  місяців експлуатації КС на 10,35% порівняно із кращими з відомих моделей.

Запропонована модель надійності ПЗ відрізняється від відомих [7–9]:

використанням нових аналітичних виразів (табл. 1) кількісної оцінки значень показників надійності, що уточнюють функціональні залежності їх зміни з часом,

доступністю вихідних даних,

реальними припущеннями і обмеженнями на використання,

повною автоматизацією операцій по новому алгоритму реалізації (рис. 1),

позитивним ефектом від використання, що полягає в підвищенні точності оцінки і прогнозування значень показників надійності ПЗ.

Достовірність результатів моделювання підтверджується використанням апробованого математичного апарату, подібністю результатів до відомих в часткових випадках, а її адекватність – перевіркою відповідності результатів розрахунків дослідним даним за критерієм узгодження  $\chi^2$  Пірсона.

## Висновки

1. Запропонована модель експлуатаційної надійності ПЗ враховує особливості фіксації відмов (щомісячно або після виникнення, табл. 1).

2. Прийняті обмеження і припущення відповідають реальним умовам експлуатації ПКЗЗ.

3. Розроблений алгоритм використання моделі (рис. 1) і наведені приклади кількісної оцінки значень показників надійності КС в процесі їх експлуатації.

4. Доведена адекватність статичної і динамічної моделей з використанням критерію узгодження [10].

5. Ефект від використання отриманих результатів полягає в підвищенні точності оцінки і прогно-

зування значень показників надійності порівняно з відомими моделями [1–9].

## Список літератури

1. Кирьянчиков В.А. Качество и надежность программного обеспечения: конспект лекций / В.А. Кирьянчиков, Э.А. Опалева. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. – 93 с.
2. Дідковська М.В. Аналіз моделей оцінювання надійності програмного забезпечення / М.В. Дідковська // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2004. – № 41. – С. 103-120.
3. Маевский Д.А. Анализ моделей надежности программного обеспечения гарантоспособных информационных систем / Д.А. Маевский, С.А. Яремчук // Электромашиностроения та електрообладнання. – 2010. – № 76. – С. 68-79.
4. Полонников Р.И. Методы оценки показателей надежности программного обеспечения / Р.И. Полонников, А.В. Никандров. – СПб.: Политехника. – 1992. – 78с.
5. Локазюк В.М. Надійність, контроль, діагностика і модернізація ПК / В.М. Локазюк, Ю.Г. Савченко. – К.: Академія, 2004. – 376 с.
6. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров– [2-е изд.]. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 704 с.
7. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: монографія. / [Бобало Ю.Я., Волочій Б.Ю., Лозинський О.Ю та інші]. – Львів: НУ ЛПІ, 2013. – 300 с.
8. Сакович Л.М. Моделювання надійності програмних засобів техніки зв'язку / Л.М. Сакович, Я.Е. Небесна, С.Є. Гнатюк // Зв'язок. – 2013. - № 1. – С. 15 – 19.
9. Сакович Л.Н. Подходы к оценке надежности программно управляемых средств связи / Л.Н. Сакович // Зв'язок. – 2010. – № 4. – С. 36 – 39.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 2002. – 575 с.
11. Сакович Л.М. Оцінювання надійності програмно-керованих засобів зв'язку / Л.М. Сакович, С.Є. Гнатюк. – Зв'язок. – 2013. – № 2. – С. 25 – 29.

Надійшла до редколегії 28.05.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.В. Козловський, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «КПІ», Київ.

## МОДЕЛЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

В.П. Зверев, С.Е. Гнатюк

*Предложена модель оценки надежности программных средств в период нормальной эксплуатации программно-управляемых средств связи. Данная модель отличается от известных использованием новых аналитических выражений количественной оценки значений показателей надежности, доступностью исходных данных, реальными допущениями и ограничениями на использование, полной автоматизацией операций согласно нового алгоритма реализации, точностью оценки и прогнозирования значений показателей надежности программных средств.*

**Ключевые слова:** программные средства, компьютерная система, показатели надежности, точность оценки.

## MODEL OPERATIONAL RELIABILITY OF SOFTWARE

V.P. Zverev, S.E. Hnatiuk

*A model for evaluating the reliability of the software during the normal operation of program-controlled communications. This model differs from the known use of new analytical expressions quantify the values of the indicators of reliability, availability of source data, the actual assumptions and limitations on the use of full automation of operations in accordance with the implementation of the new algorithm, accurate assessment and prediction values of the indicators of reliability of software.*

**Keywords:** software, computer system reliability, accuracy assessment.