

## Обчислювальні методи в радіоелектроніці

# ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ В РАДІОЕЛЕКТРОНІЦІ

УДК 621.396.66

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКИХ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

*Волочій Б. Ю., д. т. н., проф.; Озірковський Л. Д., к. т. н. доцент;  
Панський Т. І., аспірант; Муляк О. В., аспірант  
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*

## METHODOLOGY FOR DETERMINING THE RELIABILITY OF FAULT- TOLERANT HARDWARE-SOFTWARE RADIOELECTRONIC SYSTEMS

*Volochiy Bogdan, Doctor of Science (Technics), Professor; Ozirkovskyy Leonid,  
Candidate of Science (Technics), Associate Professor; Panskyi Taras, Postgraduate  
Student; Mulyak Oleksandr, Postgraduate Student  
Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine*

### Вступ

Сучасні програмно-апаратні системи (ПАС) — це складна сукупність апаратних та програмних засобів, причому взаємний вплив апаратних засобів та програмного забезпечення з точки зору надійності є настільки значним, що розділення їх в задачах аналізу обумовлене можливостями існуючих методів, а це вносить суттєву помилку в результат. Переважна більшість радіоелектронних систем є програмно-апаратними, надійність яких визначається як надійністю апаратних засобів (АЗ, *hardware* — *eng.*), так і надійністю програмних засобів (ПЗ, *software* — *eng.*). Причому, вихід з ладу АЗ призводить до виходу з ладу ПАС загалом, а збої в АЗ призводять до збоїв ПЗ. Це може призвести до тривалої зупинки АЗ, що часто в системах відповідального призначення еквівалентно відмові. Надійність АЗ, на сьогоднішній час, достатньо добре вивчена і є ряд ефективних методів для визначення показників надійності на різних етапах життєвого циклу. Методи оцінки показників надійності ПЗ дозволяють лише прогнозувати надійність ПЗ на основі експериментів та тестів, в період тестування, проте не виявлено моделей ПЗ для практичної оцінки їх надійності в період експлуатації. Тому, актуальною є розробка моделей та методик для оцінки надійності ПАС на етапі їх системотехнічного проектування з урахуванням усіх особливостей як ПЗ так і АЗ.

### Постановка задачі

У багатьох роботах, наприклад в [1], при оцінці надійності ПАС, вважають надійність ПЗ рівною одиниці і розглядають тільки надійність АЗ. В інших підходах вважається, що надійність ПАС залежить як від надійності

ПЗ, так і від надійності АЗ [2], що у вигляді структурної схеми надійності представлено на рис. 1.

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

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

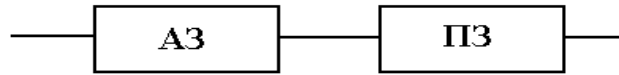


Рис. 1 Структурна схема надійності ПАС

В цих випадках вважають, що модель надійності АЗ і ПЗ є аналітичною. Для надійнісної характеристики АЗ використовують або миттєву інтенсивність відмов  $\lambda_{HW}(t)$ , або ймовірність безвідмовної роботи  $P_{HW}(t)$ , від моменту запуску АЗ до першої відмови.

$$P_{HW}(t) = e^{-\lambda_{HW}t}.$$

В якості надійнісної характеристики ПЗ використовують або миттєву інтенсивність відмов  $\lambda_{SW}(t)$ , або ймовірність правильного виконання відповідних функцій програмного забезпечення  $P_{SW}(t)$ , від моменту запуску ПЗ до першого збою.

Для оцінки надійності ПЗ використовують аналогічну як у випадку АЗ модель:

$$P_{SW}(t) = e^{-\lambda_{SW}t}.$$

Тобто в якості моделі надійності ПЗ використовують моделі, аналогічні для АЗ, механічно переносячи властивості АЗ на ПЗ. Однак механічне перенесення моделі АЗ для визначення надійності ПЗ є некоректним, оскільки особливості АЗ і ПЗ суттєво відрізняються (див. табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння особливостей апаратного та програмного забезпечення

Програмне забезпечення	Апаратне забезпечення
Не старіє	Старіє протягом довгого часу
Несправності усуваються після створення	Несправності усуваються до початку виробництва
Надійність є незмінною	Надійність змінюється
Термін тестування ПЗ є обмеженим в часі	Моделі засновані на безперервному використанні
При усуненні одних несправностей можуть бути введені інші	При відновленні несправностей інші не вводяться

Тому актуальним є створення методики визначення показників надійності ПАС з адекватними надійнісних моделями АЗ та ПЗ.

### **Розробка надійної моделі апаратного забезпечення**

Для оцінки показників надійності АЗ відмовостійких ПАС необхідно побудувати марковську модель їх поведінки [1–3]. Оскільки побудова марковських моделей ПАС є трудомісткою задачею, яка потребує значних часових затрат, то для автоматизованої побудови таких моделей доцільно застосовувати удосконалену технологію моделювання складних систем [3]. Ця технологія передбачає побудову структурно-автоматної моделі (САМ) об'єкта дослідження і на її основі автоматизовано за допомогою програмного забезпечення *ASNA* [8, 9] отримується марковська модель. Побудова структурно-автоматної моделі ПАС здійснюється на основі вербальної моделі, яка задає вхідні дані у вигляді переліку базових подій, умов і обставин, при яких ці події відбуваються. При розробці САМ необхідно вирішити наступні задачі [3]: сформулювати вектор станів; визначити множину формальних параметрів моделі; описати поведінку системи у вигляді базових подій, які відбуваються у системі, а також умов і обставин при яких відбуваються ці події; сформулювати формули розрахунку інтенсивностей переходів із стану в стан; сформулювати формули розрахунку ймовірностей альтернативних переходів; встановити правила модифікації компонент вектора станів. Наступним кроком є використання програмного забезпечення *ASNA*. Це програмне забезпечення використовує САМ як вхідні дані і автоматизовано формує граф станів і переходів, складає систему диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена (марковська модель), здійснює її розв'язок і на основі отриманого розподілу ймовірностей перебування у станах, формує показники надійності досліджуваної системи, а саме: залежності ймовірності безвідмовної роботи від часу та середнього часу напрацювання системи до відмови.

### **Розробка надійної моделі програмного забезпечення**

Процес створення та використання ПЗ включає декілька стадій: від початкової ідеї до моменту, коли ПЗ застаріло і підлягає оновленню. Цей процес називається життєвим циклом програмного забезпечення. Він складається з наступних 6 етапів:

1. Специфікація вимог (визначення задачі, документація вимог)
2. Аналіз (вивчення задачі, оцінка альтернативних методів та підходів, вибір оптимального алгоритму)
3. Проектування (визначення структури програмного забезпечення)
4. Реалізація (створення алгоритмів та кодів вибраною мовою програмування, відлагодження коду програми)
5. Тестування та верифікація (тестування вихідного тексту, різного роду перевірки програмного забезпечення на виявлення помилок та збоїв)
6. Експлуатація та супроводження (використання готового програмного продукту, оцінка ефективності, внесення необхідних змін для підтримки актуальності програмного забезпечення: оновлення базової версії програми)

много забезпечення — update, модернізація або впровадження нової автономної версії програмного забезпечення — upgrade)

На сьогоднішній день розроблено багато моделей надійності та їх модифікацій для оцінювання надійності ПЗ. Кількісно цих моделей є більше ста [5–7], та переважна більшість моделей надійності ПЗ доцільно застосувати на етапах 1–5 життєвого циклу програмного забезпечення (розробка вимог, проектування, реалізація (програмування), тестування та верифікація). Класифікацію цих моделей у відповідності до етапів життєвого циклу приведено згідно [4] на рис. 2. Основними даними для оцінки надійності таких моделей є кількість тестів, кількість прогонів, кількість помилок, які виявлені до та після тестів. Проте моделей надійності ПЗ для етапу експлуатації не виявлено.

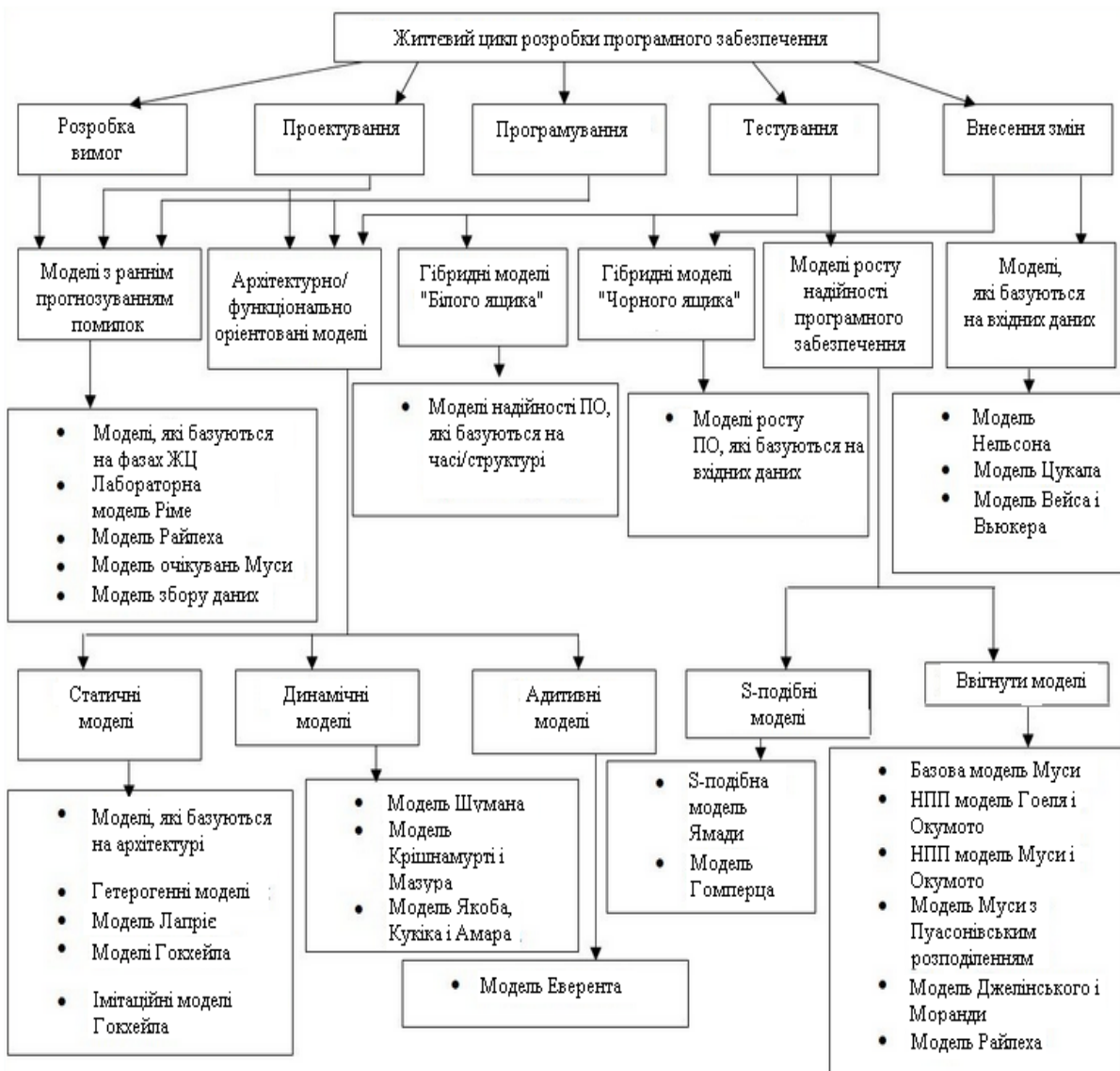


Рис. 2 Класифікація моделей надійності програмного забезпечення

Для оцінки надійності ПЗ з урахуванням оновлення на етапі експлуатації в даній роботі запропоновано використати лінійну інтерполяцію імові-

рності правильного виконання ПЗ  $P_{sw}(t)$ , у вигляді ступінчатої функції (рис. 3).

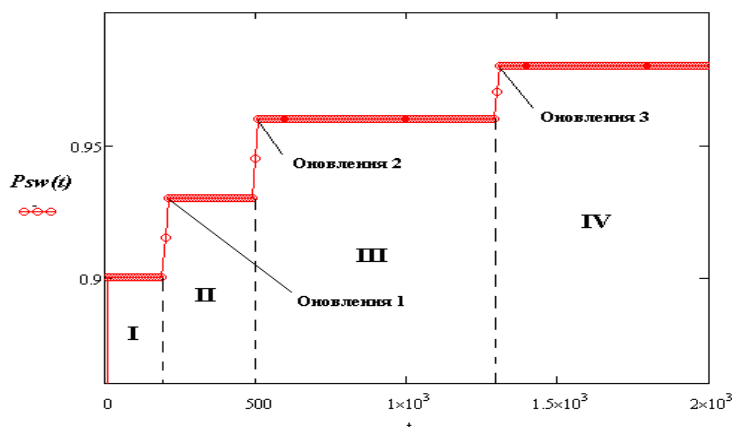


Рис. 3 Модель надійності ПЗ

Ймовірність правильного виконання ПЗ бере початок з певного сталого значення. Це значення є основним параметром ПЗ, яке отримується після етапу тестування та верифікації на основі інформації про кількість знайдених дефектів ПЗ, тривалість етапу тестування, кількість циклів тестування тощо. Стрибкоподібне зростання надійності ПЗ зумовлене оновленням ПЗ в результаті чого зменшується кількість ситуацій, коли ПЗ не функціонує належним чином (збої, зависання, тощо) і відповідно підвищується його надійність. Частота оновлень на початковому етапі експлуатації ПЗ є вищою (оновлення 1, оновлення 2), згодом зменшується (оновлення 3) і після деякого часу припиняється оновлення у зв'язку з випуском нової версії, переходу на інше АЗ тощо.

В даній роботі запропоновано використати модель надійності ПЗ на етапі експлуатації у вигляді сукупності функцій Хевісайда (одиничний стрибок).

$$P_{sw}(t) = a_1 \cdot \Phi(t) + a_2 \cdot \Phi(t - T_1) + a_3 \cdot \Phi(t - T_2) + \dots + a_n \cdot \Phi(t - T_{n-1}) \quad (2)$$

де  $\Phi(t)$  — функція Хевісайда;  $a_1$  — початкове значення ймовірності правильного виконання, яке визначається в кінці етапу тестування ПЗ;  $a_2$  — значення ймовірності правильного виконання ПЗ після першого оновлення;  $a_3$  — значення ймовірності правильного виконання ПЗ після другого оновлення;  $a_n$  — значення ймовірності правильного виконання ПЗ після n-го оновлення.

В цій моделі коефіцієнти  $a_1.. a_n$ , де  $a_1 < a_2 < a_3 < a_4$ , визначають експериментально або на основі експертних оцінок в кожному часовому інтервалі експлуатації ймовірність правильного виконання ПЗ у зв'язку з оновленням (update), чи модернізацією або випуском іншої версії даного програмного продукту (upgrade).

**Модель надійності програмно-апаратної радіоелектронної системи**

Для побудови моделі надійності ПАС в даній роботі пропонується наступна методика: на основі марковської моделі визначити надійність АЗ; на основі (2) — надійність ПЗ на етапі експлуатації і за допомогою (1) — надійність ПАС в цілому.

Процес визначення показників надійності ПАС проілюстровано на прикладі, де об'єктом розгляду є відмовостійка ПАС з мажоритарною структурою (МС), що працює за принципом 2 з 3-х і складається з однотипних модулів робочої конфігурації (М1-М3), які забезпечують реалізацію алгоритму функціонування із заданим рівнем якості, а також мажоритарного елемента (МЕ). В ПАС не передбачено відновлення несправних модулів. Кількість резервних модулів в ковзному резерві – 6.

Структурна схема надійності відмовостійкої ПАС з МС та ковзним резервом приведена на рис 4.

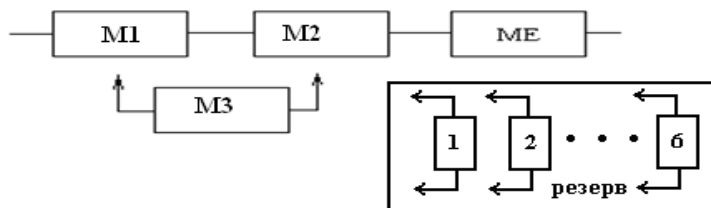


Рис.4 Структурна схема надійності відмовостійкої ПАС.

Для оцінки надійності АЗ відмовостійкої системи з мажоритарною структурою згідно [3] побудовано САМ, яка є формалізованим описом ПАС. Завантаживши САМ в програмний модуль ASNA отримаємо результати у вигляді графу станів та переходів. На основі графу станів та переходів формується аналітична модель ПАС у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена, здійснюється її розв’язок і формується розподіл ймовірностей перебування ПАС у всіх станах. На основі отриманого розподілу ймовірностей визначається імовірність безвідмовної роботи апаратних засобів  $P_{HW}(t)$ (рис.5).

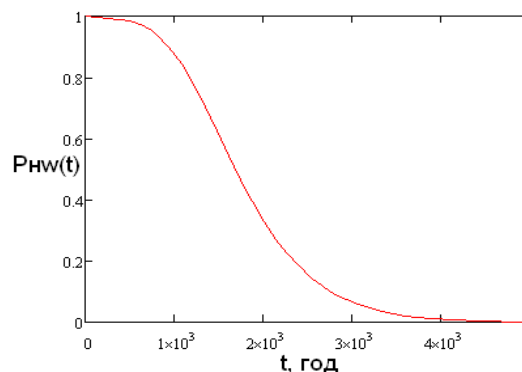


Рис. 5 Залежність ймовірності безвідмовної роботи АЗ від тривалості експлуатації

Використовуючи отриману залежність ймовірності безвідмовної роботи АЗ та ймовірність правильного виконання ПЗ (2) отримано згідно (1) значення ймовірності безвідмовної роботи ПАС від часу експлуатації (рис.6). При визначенні ймовірності правильного виконання ПЗ прийнято, що після етапу тестування та верифікації початкова ймовірність правильного виконання  $a_1=0,9$ , після першого оновлення  $a_2=0,93$  та час до першого оновлення  $T_1=200$  год, після другого оновлення  $a_3=0,96$  та час до другого оновлення  $T_2=400$  год, та після останнього оновлення  $a_4=0,99$  та час до останнього оновлення  $T_2=1300$  год.

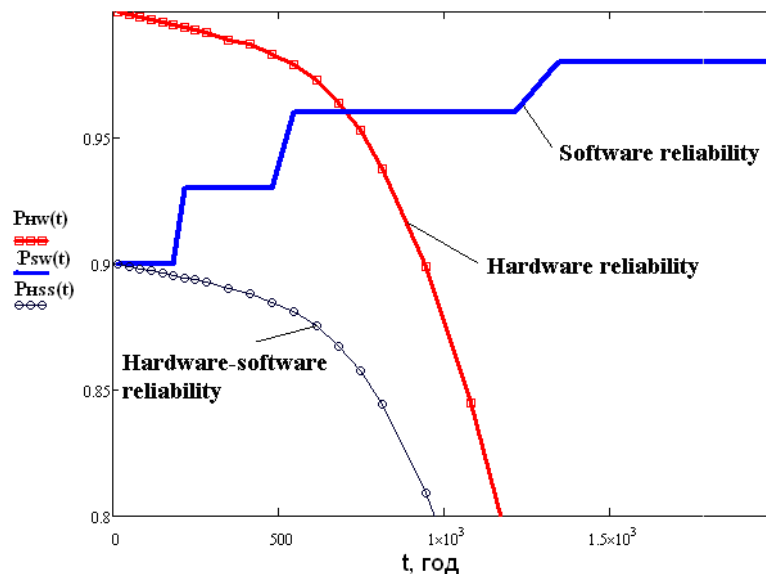


Рис. 6. Залежності показників надійності апаратних засобів, програмного забезпечення та програмно-апаратної системи в цілому від тривалості експлуатації

Надійність ПАС суттєво залежить від надійності ПЗ на перших етапах експлуатації, а з моменту часу, коли оновлення та модернізація ПЗ припиняється визначальною є надійність АЗ.

### Висновки

Розроблена методика визначення показників надійності відмовостійких програмно-апаратних систем дає змогу адекватно врахувати особливості програмного забезпечення на етапі експлуатації, зокрема його оновлення. Для цього побудовано нову модель надійності програмного забезпечення у вигляді сукупності функцій Хевісайда. Застосування розробленої методики показало, що надійність програмно-апаратних систем на початкових етапах експлуатації визначається надійністю програмного забезпечення, а на кінцевих - надійністю апаратного забезпечення.

### Література

1. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: Учебное пособие / Г. Н. Черкесов. — СПб. : Питер, 2005. — 479 с. — ISBN 5-469-00102-4. [\[Publ.\]](#)



2. Иьуду К. А. Метематические модели отказоустойчивых вычислительных систем / К. А. Иьуду, С. А. Кривошеков. — М. : Изд-во МАИ, 1989. — 144 с. — ISBN 5-7035-0004-4
3. Волочий Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем / Б. Ю. Волочий. — Львів: Вид-во НУ “Львівська політехніка”, 2004. — 220с.
4. Чернов А. В. Классификация моделей надежности программного обеспечения / А. В. Чернов, И. Г. Парашенко // Инженерный вестник Дона. — 2012. — № 4. — 3 с. [\[Publ.\]](#)
5. Friedman M. A. Reliability techniques for combined hardware and software systems / M. A. Friedman, P. Y. Tran, P. L. Goddard ; Final technical report ; Rome Laboratory Air Force Systems Command, Griffiss Air Force Base. — New York. — 1992. — 286 p. [\[Publ.\]](#)
6. Luy M. R. Handbook of software reliability engineering / M. R. Luy. — Ca. : IEEE Computer Society Press, 1996. [\[Publ.\]](#)
7. Musa J. D. Software Reliability Models: Concepts, Classification, Comparisons, and Practice / J. D. Musa, K. Okumoto // Electronic Systems Effectiveness and Life Cycle Costing. — 1983. — Vol. 3. p. 395—423.
8. Bohdan V. The software for the analysis of reliability of fault-tolerant radio-electronic systems / B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, P. Klochko // Uradzenia i systemy radioelektroniczne UiSR’09 : III Konferencja naukowa, 23-25 wresnia 2009 / Wojskowa Akademia Techniczna. — Soczewka, 2009.
9. Мандзій Б. Автоматизація моделювання поведінки радіоелектронних інформаційних систем / Б. Мандзій, Б. Волочий, Л. Озірковський, П. Клочко // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009) : IV Міжнародна науково-технічна конференція, 8-10 жовтня 2009 / ВНТУ. — Вінниця. — с.19.

#### References

1. Cherkasov G. N. (2005) *Nadezhnost aparatno-programnykh kompleksov* [Reliability hardware and software systems]. SPb., Piter Publ. 479 p. Available at: [\[Publ.\]](#)
2. Iyudu K. A., Krivoshchekov S. A. (1989) *Matimaticheskie modeli otkazoustoichevykh vychislitelnykh system* [Mathematical models of fault-tolerant computing systems]. Moskow, MAI Publ., 144 p. – ISBN 5-7035-0004-4
3. Volochiy B. Y. (2004) *Tekhnolohiia modeliuвання alhorytmiv povedinky informatsiinykh system* [Technology modeling algorithm of information systems]. Lviv, Lviv Polytechnic National University Publ., 220 p.
4. Chernov A. V., Parashhenko I. G. (2012) Klassifikacija modelej nadezhnosti programmного obespechenija [Classification of software reliability models]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. No 4, 3 p. – Available at: [\[Publ.\]](#)
5. Friedman M. A., Tran P. Y., Goddard P. L. (1992) *Reliability techniques for combined hardware and software systems*. Air Force Systems Command, Griffiss Air Force Base, New York. 286 p. [\[Publ.\]](#)
6. Luy M. R. (1996) *Handbook of software reliability engineering*. Ca., IEEE Computer Society Press. [\[Publ.\]](#)
7. Musa J. D., Okumoto K. (1983) Software Reliability Models: Concepts, Classification, Comparisons, and Practice. *Electronic Systems Effectiveness and Life Cycle Costing*. Vol. 3, pp. 395-423. doi: [\[Publ.\]](#)
8. Bohdan V., Ozirkovskyy L., Klochko P. (2009) The software for the analysis of reliability of fault-tolerant radio-electronic systems. *Uradzenia i systemy radioelektroniczne UiSR’09*. Soczewk, Wojskowa Akademia Techniczna.
9. Mandziy B., Volochiy B., Ozirkovskyy L., Klochko P. (2009) Avtomatyzacija modeljuvannja povedinky radioelektronnyh informacijnyh system [Computer-aided



simulation of the behavior of electronic information systems]. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Instrumentation (SPRTP-2009)*. Vinnitsa, p.19.

*Волочій Б. Ю., Озірковський Л. Д., Панський Т. І., Муляк О. В. Методика визначення показників надійності відмовостійких програмно-апаратних радіоелектронних систем. У роботі представлена методика визначення надійності програмних засобів на етапі експлуатації, розроблена методика визначення надійності програмно-апаратних радіоелектронних систем у відповідності до вимоги програмного та апаратного забезпечення.*

**Ключові слова:** надійність, програмне забезпечення, апаратне забезпечення, програмно-апаратні системи

*Волочий Б. Ю., Озирковский Л. Д., Панский Т. И., Мulyak О. В. Методика определения показателей надежности отказоустойчивых программно-аппаратных радиоэлектронных систем. В работе представлена методика определения надежности программных средств на этапе эксплуатации, разработана методика определения надежности программно-аппаратных радиоэлектронных систем в соответствии с требованиями программного и аппаратного обеспечения.*

**Ключевые слова:** надежность, программное обеспечение, аппаратное обеспечение, программно-аппаратные системы.

*Volochiy B. Y., Ozirkovskyy L. D., Panskyi T. I., Mulyak O. V. Methodology for determining the reliability of fault-tolerant hardware-software radioelectronic systems.*

*Introduction. The majority of radioelectronic systems are hardware-software systems. Their reliability is defined as the reliability of hardware and software. Methods for estimating software allow to predict reliability based on experiments and tests during the testing verification and validation time, but there is no specific models for assessing the reliability during operation time.*

*Problem statement. In many approaches, when assessing the reliability of hardware-software systems consider that software reliability is equal to 1, and consider only reliability of hardware. In other approaches consider that the reliability of PAS depends on the software and hardware reliability. Hardware and software features differ significantly. Important is to create methodology for determining the reliability of hardware-software systems considering hardware and software adequate models.*

*Developing software reliability models. Was carried out the analysis of software reliability models according to its life cycle. Software reliability model in operation time is proposed as a set of Heaviside functions.*

*Developing hardware reliability models. Was carried out the analysis of hardware reliability according to the technology [3].*

*Developing software-hardware reliability models. Was carried out the analysis of software-hardware systems considering the reliability of hardware and software during operation time.*

**Keywords:** reliability, hardware-software system, hardware, software, fault tolerant systems.