

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-54>

УДК 004.052: 004.94

ВДОВІЧЕНКО Олександр

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0001-8695-1752>

[o.vdovichenko@csn.khai.edu](mailto:o.vdovichenko@csn.khai.edu)

ХАРЧЕНКО Вячеслав

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>

[v.kharchenko@csn.khai.edu](mailto:v.kharchenko@csn.khai.edu)

## МАРКОВСЬКІ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ПРОГРАМОВНИХ ПРИБОРІВ З КЕРОВАНОЮ БАГАТОРІВНЕВОЮ ДЕГРАДАЦІЄЮ: КЛАСИФІКАЦІЯ, РОЗРОБЛЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ

Надано результати розроблення та аналізу марковських моделей програмовних пристроїв (ПП) (мікроконтролерів, програмовних логічних інтегральних схем та ін.) з керованою багаторівневою деградацією (БРД) для оцінювання їх готовності, які враховують можливості різних процедур реконфігурації структури при відмовах. Основні результати дослідження: обґрунтовано припущення та належність моделей готовності ПП з БРД до класу багатофрагментних марковських моделей (БММ) з дискретними станами та неперервним часом; розроблено класифікацію цих моделей за ознаками змінності параметрів, зокрема, рівнів деградації ресурсів ПП та засобів реконфігурації, виду реконфігуропродатності, наявності помилок контролю тощо; розроблено БММ та досліджено залежності готовності від параметрів безвідмовності та відновлюваності компонентів шляхом реконфігурації структури за різними процедурами. Створено модельний базис для оцінювання надійності та живучості ПП, який може доповнюватися за новими ознаками та параметрами пристроїв.

Ключові слова: програмовні пристрої, керована багаторівнева деградація, класифікація моделей надійності, багатофрагментні марковські моделі, функція готовності

VDOVICHENKO Oleksandr, KHARCHENKO Vyacheslav

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

## MARKOV MODELS FOR DEPENDABILITY ASSESSING THE OF PROGRAMMABLE DEVICES WITH CONTROLLED MULTI-LEVEL DEGRADATION: CLASSIFICATION, DEVELOPMENT AND RESEARCH

The research focuses on the development of Markov models for assessing the availability of programmable devices (PDs), such as microcontrollers and FPGAs, that operate under controlled multi-level degradation (CLD). These models account for various reconfiguration procedures that can be employed in the event of system failures, ensuring that the system can recover and maintain functionality. The findings of this research can be summarized as follows:

First, the assumptions that the availability models for PDs belong to the class of multi-fragment Markov models (MFMM), characterized by discrete states and continuous time, have been substantiated. This class of models is particularly suited for analyzing complex systems like PDs, where components may degrade over time and require reconfiguration.

A classification of models was developed to assess the availability of PDs with CLD, incorporating the variability of different parameters that affect the system's performance. These parameters include the levels of degradation of the PD's resources, the means of reconfiguration, the attributes of reconfigurability, and the presence of errors during testing and reconfiguration processes. This classification enables a comprehensive evaluation of how different failure modes and reconfiguration strategies influence the availability of the device.

Additionally, the MFMM was extended to investigate the dependence of PD availability on the failure and recovery rates. The research specifically focused on how the means and procedures of structure reconfiguration can impact these rates, and consequently, the overall availability of the PD. This analysis provides critical insights into the effectiveness of various recovery mechanisms and their ability to restore PD functionality after failure.

Lastly, a model base was created to assess the reliability and survivability of PDs under controlled degradation conditions. This model base is flexible and can be expanded with new features and parameters, allowing for the continuous adaptation of the model to include advancements in PD technology or to account for emerging failure modes and recovery strategies.

The developed models offer a robust framework for assessing PD availability in real-world scenarios, particularly in applications that require high reliability and the ability to recover from partial failures. The model base also serves as a foundation for further research and development in the area of PD reliability and survivability.

Keywords: programmable devices, controlled multilevel degradation, classification of reliability models, multi-fragment Markov models, availability function.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Програмовні пристрої (ПП), а саме промислові логічні мікроконтролери, програмовні інтегральні схеми (FPGA, CPLD) та платформи пройшли багаторічну еволюцію і створили потужний схемотехнічний базис. Їх особливістю і безсумнівною перевагою є гнучкість і програмовність структури, що забезпечує конкурентність на ринку електронних компонентів. Застосування ПП в

критичних системах з високою ціною відмов також прискорилося завдяки показникам надійності та створенню сертифікованих рішень за вимогами функційної безпеки, що дещо розвантажує складні процеси розроблення, верифікації та сертифікації платформних рішень для інформаційно-керуючих систем, зокрема, в атомній енергетиці [1]. Однак, для систем з тривалим часом використання, що експлуатуються в умовах жорсткого фізичного середовища (космічного простору, електромагнітних впливів при застосуванні БПЛА тощо), необхідні додаткові зусилля для надання можливості продовження виконання функцій, навіть в обмеженому об'ємі, при виникненні одиничних та множинних відмов внутрішньої структури ПП. Відповіддю на такі виклики стало формування класу пристроїв і систем з багаторівневою деградацією (БРД), коли погіршуються характеристики або не виконується частина функцій [2], та розвиток теорії, так званих multi-state systems (MSS) [3].

Отже, важливим є застосування і розвиток відповідних моделей і методів для аналізу можливостей керування БРД з урахуванням особливостей ПП, оцінювання їх надійності і живучості, а також динамічної реконфігурації структури при відмовах компонентів. В даній статті розглядається клас програмних пристроїв і систем з керованою БРД, які досліджувалися раніше авторами в [2,4-6].

### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Публікації, в яких досліджуються проблеми, дотичні до ПП з БРД, класифіковано і проаналізовано за двома напрямками:

- методи та засоби реконфігурації ПП при відмовах. Більшість публікацій за цим напрямком стосується різноманітних моделей, алгоритмів, архітектур для пристроїв на базі програмних логічних інтегральних схем (FPGA), природно налаштованих на реконфігурацію за сутністю. Зокрема, досліджуються і розробляються рішення, які збалансовують продуктивність і безпеку систем при відмовах [7], забезпечують толерування одиничних і множинних збоїв [8]. В роботах [9] і [10] оглядають найбільш поширені техніки відмовостійкості та проектування стійких до відмов програмних біотипів відповідно. Аналіз відмовостійких рішень для програмно визначених (Software Defined) мереж, серверів дата центрів та мультипроцесорних систем надано в [11-13]. Огляд методів і засобів забезпечення відмовостійкості мікроконтролерів з врахуванням впливу на енергоспоживання, теплові режими тощо представлено в [14];

- моделі та методи оцінювання надійності та живучості програмних пристроїв та систем з багаторівневою працездатністю. Такі об'єкти належать до класу MSS (систем з багаторівневими станами – систем з БРД), які доволі ретельно та глибоко з математичної точки зору досліджено в роботах [3,15,16]. Однак ці методологія і технологія моделювання мають обмеження, обумовлені складністю об'єктів та можливостями побудови систем з багатьма рівнями деградації, відмінністю цих процесів, об'ємом втраченої працездатності та багаторівневим відновленням [2, 17], що потребує суттєвих зусиль для коректного опису множин станів і переходів.

На підставі аналізу публікацій зазначимо, що, по-перше, методи і засоби забезпечення відмовостійкості для мікроконтролерів базуються, перш за все, на застосуванні структурного резервування, програмного відновлення через використання традиційних механізмів контрольної точки, повторення обчислень та ін., і не забезпечують толерування відмов внутрішніх компонентів шляхом програмної перебудови структури та впровадження керованості деградацією. По-друге, відомі рішення для FPGA-пристроїв орієнтовані на використання матричної структури і реконфігурацію на рівні логічних комірок без задіяння механізмів відмовостійкості для IP-ядер емульованих контролерів. Саме для задач реконфігурації програмно-апаратних ресурсів контролерів при відмовах відсутні досконалі рішення. По-третє, несистематизованою є модельна база для оцінювання таких ПП з врахуванням можливої багаторівневої деградації (працездатності), оскільки не описано види дефектів та наслідки їх відмов з огляду на можливість повного або часткового толерування та різних рівнів деградації.

### ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є розроблення і дослідження математичних моделей програмних пристроїв з БРД для оцінювання їх готовності, які враховують можливості різних процедур реконфігурації структури при відмовах. Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

- обґрунтувати припущення та належність моделей готовності ПП до класу марковських моделей з дискретними станами та неперервним часом;
- визначити систему ознак та виконати класифікацію моделей для оцінювання готовності програмних пристроїв з БРД;
- запропонувати та описати множину марковських моделей систем згідно запропонованої класифікації;
- надати приклад розроблення, дослідження моделей та оцінювання готовності програмних пристроїв з БРД.

### Методологія і послідовність розроблення і дослідження моделей

При дослідженні ПП обґрунтовуються припущення щодо можливості опису їх надійної поведінки (процесів відмов і відновлень шляхом автоматичної реконфігурації при відмовах різних компонентів) моделями марковських випадкових процесів з дискретними станами, які фіксують знаходження пристроїв у:

- повністю працездатному стані;
- частково працездатних станах, які характеризуються різними рівнями деградації  $d$  (втратою частини функцій або якості їх виконання);
- стані збою (нетривалої втрати працездатності з відновленням);
- повністю непрацездатному стані, який може бути небезпечним,

та неперервним часом зміни станів.

Робимо припущення про експоненціальний розподіл часу зміни станів та незалежність ймовірностей  $P(S_i \rightarrow S_j, t)$  переходів зі стану  $S_i(t)$  в стан  $S_j(t+\Delta t)$  від ймовірностей переходів зі станів  $\{S_k^{(i)}(t-\Delta t), k = 1, \dots, r_i\}$ , де  $r_i$  – кількість станів, з яких є перехід в стан  $S_j$ . Отже йтиметься про марковські моделі, хоча подальша класифікація моделей є загальною і не потребує введення таких припущень. При зміні рівнів деградації поведінка пристроїв описується мультифрагментними моделями, які складаються з типових фрагментів, які повторюються за структурою і відрізняються значеннями певних параметрів [17].

Для класу ПП, що досліджуються, існує можливість реконфігурації при частині відмов спеціальними зовнішніми програмно-апаратними засобами без втрати або з частковою втратою працездатності (деградацією). Отже вони мають властивість потенційної реконфігуропритатності, яка реалізується за допомогою низки процедур реконфігурації. В рамках дослідження надійності та готовності реконфігуропритатних програмних пристроїв з керованою БРД, з'являється можливість опису комбінацій характеристик ПП і спеціальних засобів реконфігурації, а також врахування різноманітних умов і факторів впливу для подальшої оцінки та порівняння надійності варіантів побудови ПП та засобів реконфігурації.

Дослідження проводитиметься за етапами:

- розроблення класифікатора ММ ПП:
  - формування множини ознак ММ ПП;
  - визначення відношень між ознаками (фасетні, ієрархічні, змішані);
  - формування підмножин ММ за кожною з ознак;
- формування множини ММ ПП:
  - визначення комбінацій класифікаційних ознак для формування класів марковських моделей (у загальному вигляді Декартового добутку підмножин ММ за ознаками);
  - аналіз сумісності класифікаційних ознак ММ ПП;
  - фіксація можливих ММ ПП з точки зору доцільності їх дослідження;
- вибір ММ ПП для детального розроблення та дослідження за запропонованою методикою.

### Класифікація марковських моделей

На основі аналізу об'єкту дослідження – ПП [2, 4, 5, 9-13] визначено сім ознак для класифікації марковських моделей. Для зручності, розташуємо ознаки за зростанням складності самого ПП. Розрізнятимемо наступні групи ознак:

За наявністю змінних параметрів, які визначають інтенсивності відмов під час багаторівневої деградації:

- однофрагментні моделі (ОФМ), в яких відсутні змінні параметри. В такому випадку деградація є однорівневою і множина станів не є повторюваною;
- мультифрагментні моделі (МФМ), в яких є змінні параметри [5, 15]. В такому випадку деградація є багаторівневою і множина станів є повторюваною. Такі множини повторюваних станів називаються фрагментами.

Ознаки ОФМ:

1. Потенційна реконфігуропритатність:

- відсутня. В такому випадку відновлення після відмови з частковою або повною втратою працездатності є неможливим, що не передбачає застосування керування БРД;
- наявна. В цьому випадку у системи є можливість до відновлення через реконфігурацію при наступних дефектах:
  - дефекти групи  $B1(Def_{B1})$ . Ця група визначає сукупність дефектів, які призводять до стану часткової відмови некритичних ресурсів ПП. При цьому зберігається можливість повного відновлення працездатності;
  - дефекти групи  $B2(Def_{B2})$ . Сукупність дефектів, які призводять до стану часткової відмови некритичних ресурсів ПП. За таких дефектів повне відновлення стає неможливим, однак зберігається можливість пом'якшення наслідків відмови до припустимого рівня;

- дефекти групи  $C1(Def_{C1})$ . Ця група визначає сукупність дефектів, які призводять до повної відмови некритичних ділянок системи. При цьому зберігається можливість повного відновлення працездатності;
  - дефекти групи  $C2(Def_{C2})$ . Ця група визначає сукупність дефектів, які призводять до повної відмови некритичних ділянок системи. При цьому зберігається можливість пом'якшення наслідків відмови з частковим відновленням працездатності.
2. Помилки засобів контролю:
- враховуються. Описуються стани системи, які виникають у результаті хибних спрацювань системи контролю, діагностування та реконфігурації. Внаслідок цього передбачається виникнення наступних станів:
    - стан прихованої відмови. Описує випадок, коли система контролю не відстежила виникнення дефекту, та не надала команди на проведення реконфігурації;
    - стан хибної відмови. Описує випадок, коли система контролю надала команду на проведення реконфігурації без виникнення дефекту;
    - стан некоректної ідентифікації відмови. Описує випадок, коли система контролю внаслідок виникнення дефекту надала команду до проведення реконфігурації, не дотичної до місця і/або виду дефекту.
  - не враховується. В цьому випадку засоби контролю та реконфігурації вважаються ідеальними.
- Ознаки МФМ:
3. Наявність параметрів, що змінюються протягом деградації. З кожним додатковим змінним параметром, марковська модель стає багатофрагментною за ще одним напрямком (виміром). Для програмовних пристроїв з керованою БРД визначимо наступні змінні параметри:
- кількість рівнів деградації ресурсів власне програмовного пристрою;
  - кількість рівнів деградації засобів реконфігурації (ЗР);
  - кількість рівнів деградації ресурсу реконфігурації (РР);
  - кількість рівнів деградації засобів контролю (ЗК).

Якщо враховувати дефекти та вразливості програмних засобів (кодів електронних проектів ПП), то змінними також можуть бути інтенсивності прояву відповідних дефектів та атак на вразливості при їх детектуванні та усуненні [4].

4. Комбінації залежних одне від одного змінних параметрів, що визначаються їх можливою одночасною змінністю і обмежуються кількістю змінних параметрів.
5. Кратність резервування засобів реконфігурації, яка визначається запасом ресурсів, відмова яких не призводить до часткової або повної працездатності.

Виходячи з описаних груп ознак, побудовано класифікатор, представлений на рисунку 1.

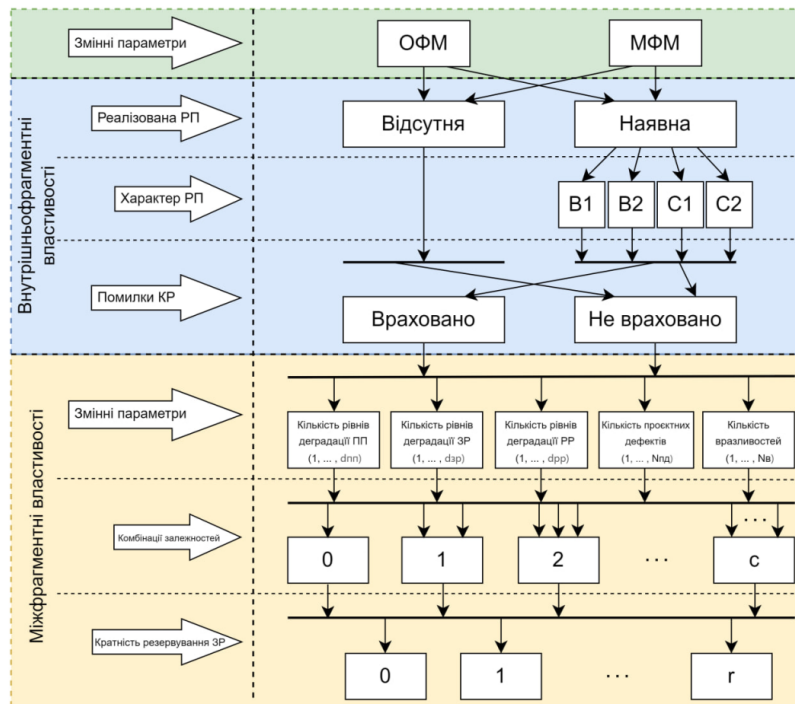


Рис. 1. Класифікатор марковських моделей ПП з БРД

Таке представлення надає можливість покроково аналізувати варіанти марковської моделі, враховуючи ознаки як одного фрагмента, що визначає кількість початкових станів системи та можливості використання внутрішнього ресурсу, так і ознаки множин фрагментів, де береться до уваги їх підпорядкованість одне одному з урахуванням змінних параметрів та характеру взаємодії.

### Розроблення та дослідження багатодіагностичних марковських моделей

В рамках розглянутої класифікації, важливим етапом буде дослідження впливу обраних факторів на структурні та поведінкові зміни марковських моделей. Так, згідно сполук внутрішніх властивостей фрагменту для ОФМ можна надати варіанти представлення, зображені на рисунку 2.

Наведені варіанти побудови, залежно від врахування певних ознак, набувають додаткові стани – вершини графу надійнісної поведінки. Так, для ОФМ без потенційної реконфігуропритатності визначаються наступні базові стани:

Su (Up-state) – працездатний стан,

Se (Error-state) – стан збою, що усувається програмним забезпеченням самого пристрою,

Sf (Failure-state) – стан відмови, що порушує нормальний режим роботи пристрою.

Переходи між станами характеризуються наступними інтенсивностями:

$\lambda_e$  – інтенсивність виникнення збоїв ПП,

$\mu_e$  – інтенсивність відновлення після збоїв ПП,

$\lambda_f$  – інтенсивність виникнення відмов ПП.

При наявних ознаках реконфігуропритатності, у додаток до базового набору станів моделі додаються стани, які характеризують тип спостережної деградації, а саме:

St (Tally-state) – стан ресурсної деградації, при якому ПП не зазнає вагомих втрат при відновленні,

Sd (Degradation-state) – стан функційної деградації, при якому ПП втрачає вагому частину своїх можливостей та/або якісних характеристик.

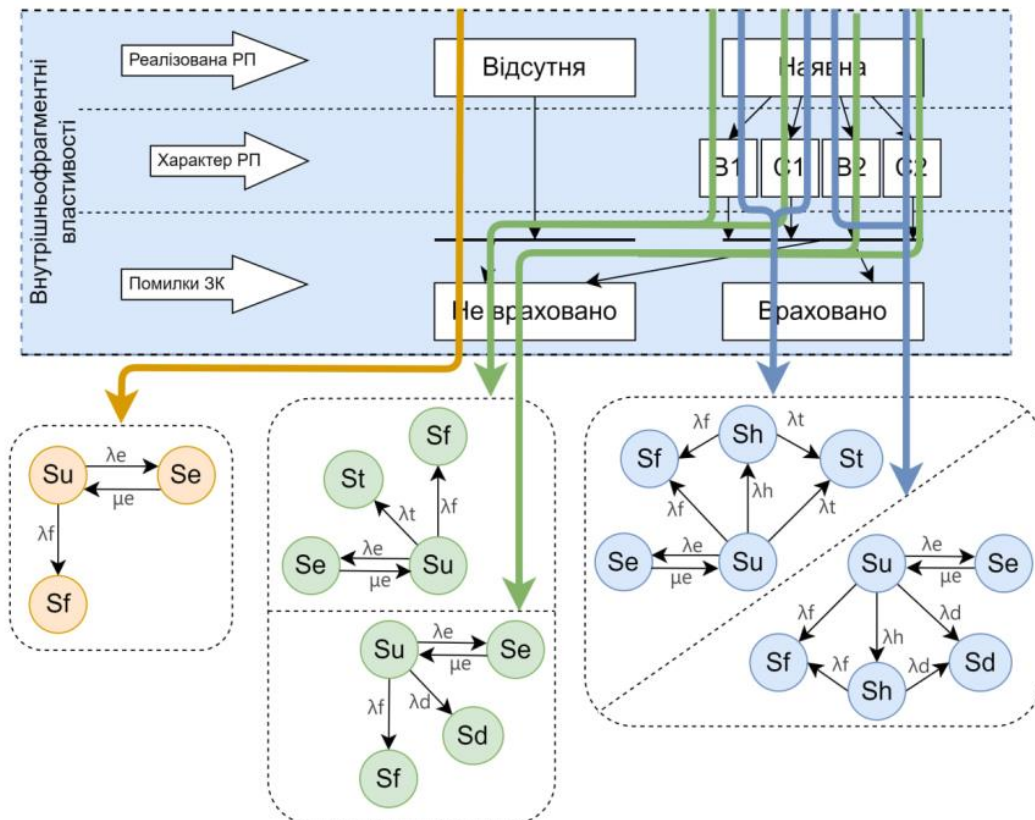


Рис. 2. Побудова ОФМ ПП з БРД за допомогою класифікатора

Переходи до станів деградації характеризується відповідними інтенсивностями:

$\lambda_t$  – інтенсивність ресурсної деградації ПП,

$\lambda_d$  – інтенсивність функційної деградації ПП.

Слід зазначити, що варіант представлення фрагмента, який містить у своєму наборі станів одночасно кілька станів деградації також є можливим. Для моделей, де засоби контролю розглядаються як вразлива, не

абсолютно надійна частина системи, важливим є враховувати можливість її некоректної роботи. В цьому випадку модель містить

Sh (Hidden-state) – стан прихованої відмови, коли визначення характеру деградації/відмови засобами контролю не виконується.

У випадку прихованої відмови, перехід до станів деградації може здійснюватися через стан Sh, перехід до якого характеризується інтенсивністю

$\lambda_h$  – інтенсивність виникнення прихованих відмов ПП, що можна описати рівнянням (1)

$$\lambda_h = kh * (1 - D) * \lambda_0 \quad (1)$$

$$\lambda_f = kf * D * \lambda_0, \quad (2)$$

$$\lambda_t = kt * D * \lambda_0, \quad (3)$$

$$\lambda_e = ke * D * \lambda_0. \quad (4)$$

де  $kh, kf, kt, ke$  – це зважуючі коефіцієнти відповідного типу,  $D$  – це достовірність (ймовірність достовірного) контролю, а  $\lambda_0$  – це базова інтенсивність подій ПП. Аналогічно, для інших інтенсивностей будуть відповідними вирази (2 - 4).

Відповідно до описаних зв'язків між фрагментами моделей, варіанти побудови МФМ можуть бути представлені відповідно до рисунку 3.

Наведені варіанти побудови МФМ, залежно від врахування певних ознак, набувають додаткових вимірів – повторення фрагментів з ОФМ зі зміною параметру, що й викликав деградацію. Так, для МФМ зі зміною одного параметра, таке повторення здійснюється в одному вимірі, а сама МФМ має вигляд лінійного графу фрагментів. Станами переходів між фрагментами є стани деградації (St, Sd, Sr...) з доступним працездатним станом (Su), що відповідає змінам у ПП. Переходи між фрагментами здійснюються через подію відновлення (реконфігурації), яка характеризується інтенсивністю відновлення після реконфігурації ( $\mu_r$ ).

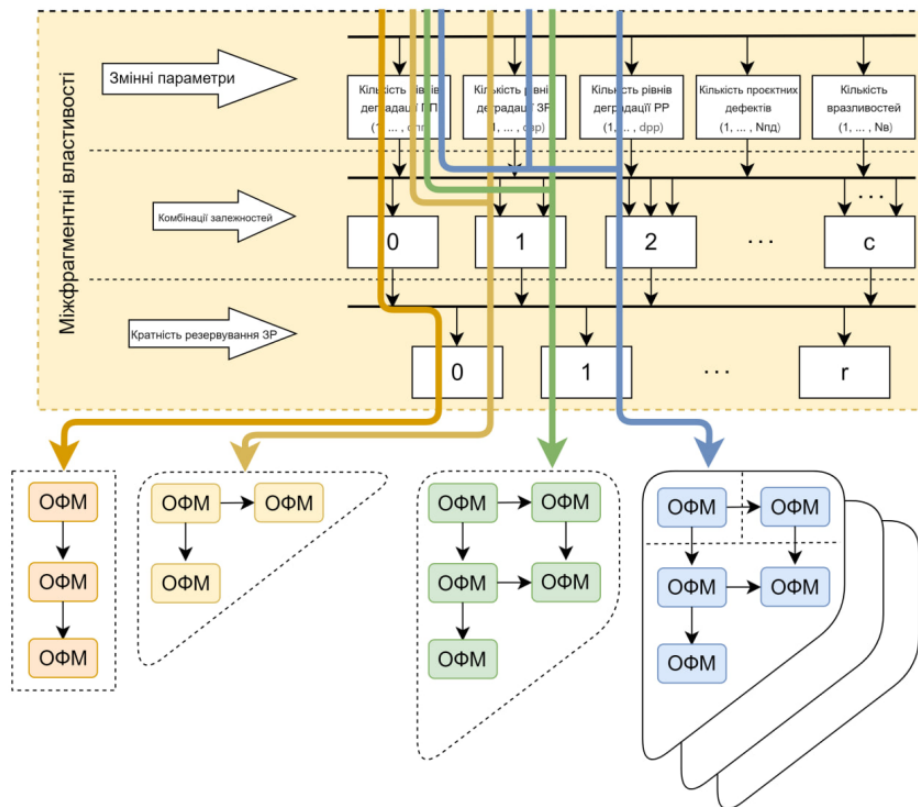


Рис. 3. Побудова МФМ ПП з БРД за допомогою класифікатора

Для деяких параметрів, які впливають на деградацію, може бути врахована можливість резервування. Так, резервуючи зовнішні частини системи (засоби контролю, керування реконфігурацією, резервні ресурси), які не входять до складу самого ПП), можна уповільнити деградацію відповідного засобу.

**Приклади застосування класифікатора та розроблення моделей**

У якості прикладу застосування класифікатора пропонується розглянути систему, побудовану на основі 8-контактного мікроконтролера ATtiny13A [18]. При нормальному режимі роботи мікроконтролера відмова самого чіпу, або хоча б одного контакту порушує його функціонування. Такий режим можна представити у вигляді ОФМ на рисунку 4.

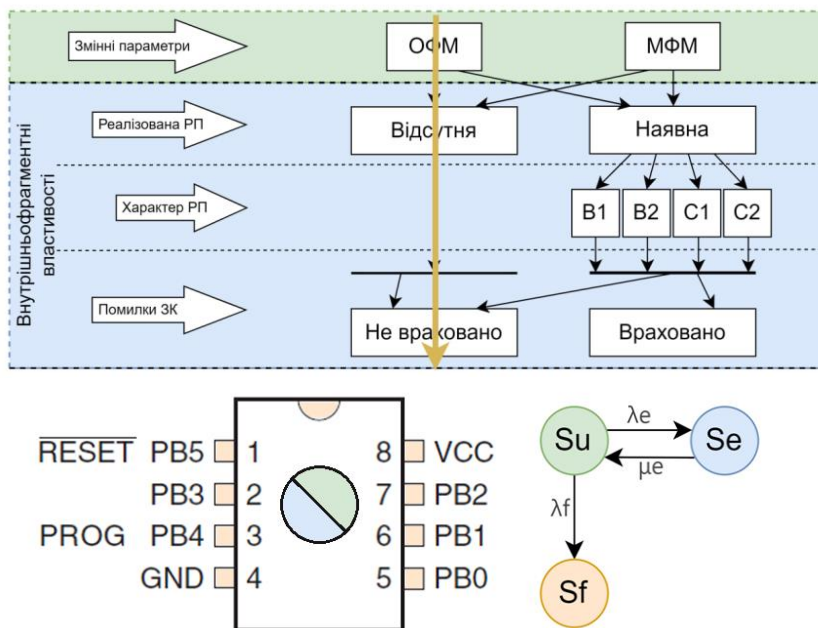


Рис. 4. ОФМ для мікроконтролера ATtiny13A без реалізації РП

Далі визначимо, що відмови критичних елементів чіпу, та однотипних контактів порту РВ можуть також бути спричинені дефектами типів В2 та С2. Це пов'язано з тим, що порт В оснащується двонаправленими контактами з підтягувальними резисторами. Завдяки такій структурі контакти здатні виконувати спільні маніпуляції і діяти як резерв один для одного [4], що є ознаками потенційної РП. Завдяки програмній модифікації завантажувача мікроконтролера з'являється інструмент для віддаленого коригування коду, що надає змогу перерозподіляти виконувані завдання між працездатними контактами, тобто реалізовувати потенційну РП. Згідно цьому, можливі варіанти ОФМ, що ілюструються відповідними траєкторіями на рисунку 5.

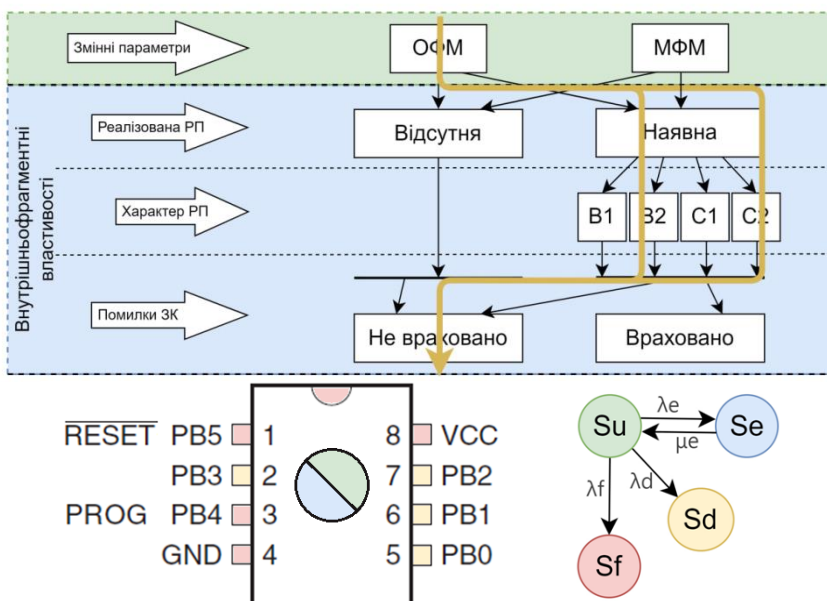


Рис. 5. ОФМ для мікроконтролера ATtiny13A з реалізацією РП

Управління навантаженням на обрані контакти обмежено різницею між кількістю наявних контактів, та кількістю мінімально необхідних для обміну даними. Згідно з існуючими форматами обміну сигналами, для виконання обміну потрібно мінімум два контакти, що при наявних чотирьох надає можливість двократного відновлення при їхніх одиничних відмовах.

Для випадку реалізації засобів реконфігурації (ЗР) у форматі зовнішнього пристрою або системи пристроїв, їх впливом на загальну схему надійності можна знехтувати при побудові МФМ ПП з БРД. Таким чином, простий варіант БРД описуватиметься МФМ з лінійною структурою з'єднання фрагментів, представленим на рисунку 6.

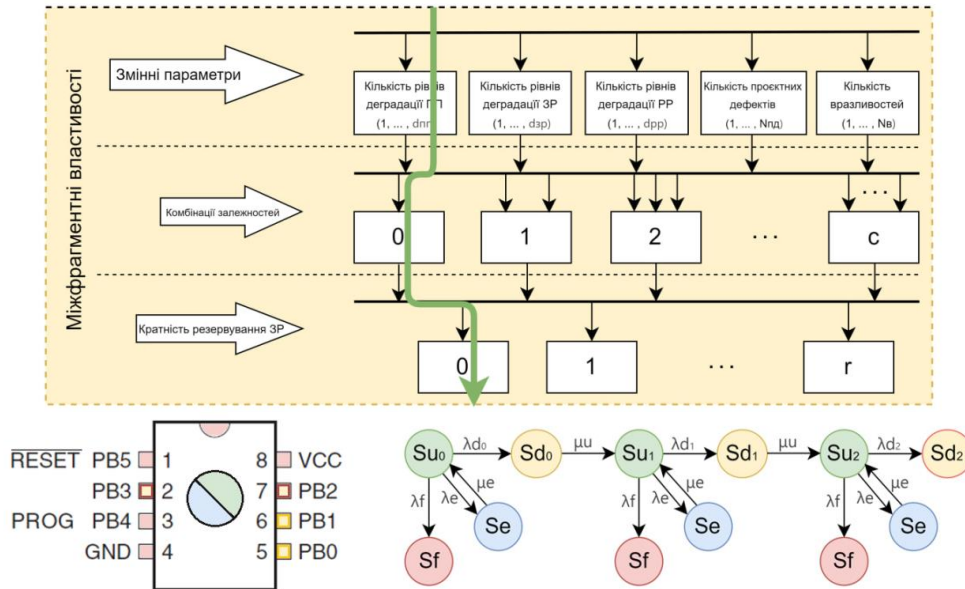


Рис. 6. Побудова лінійної МФМ ПП з БРД за допомогою класифікатора

Описана вище поведінка системи відповідає випадку, коли засоби керування реконфігурацією вважаються абсолютно надійними та коректними, а процедури перерозподілу навантаження на контакти є доступними та виконуваними. Цикли перезапису вмісту мікросхеми не обмежені, а самі процедури не пов'язані з витрачанням ресурсів мікросхеми або самої системи керування реконфігурацією.

Відповідно до представленої лінійної МФМ, існуючі стани в межах фрагменту набувають наступних змін:

- працездатні стани ( $Su_i$ ) кожного з фрагментів нумеруються відповідно рівню виконаної деградації;
- стани деградації ( $Sd_i$ ) та відповідні події деградації з відповідною інтенсивністю ( $\lambda_{d_i}$ ) мають індекси працездатних станів, для яких вони є похідними;
- перехід між фрагментами здійснюється за рахунок відновлення після реконфігурації, яка характеризується інтенсивністю  $\mu$ .

У випадку, коли реалізації засобів реконфігурації (ЗР) вимагає врахування їх впливу на модель, кількість змінних параметрів збільшується, що, у свою чергу, додає ще один вимір МФМ. Оскільки якість ЗР впливає на кількість можливих процедур відновлення, то її втрата (деградація внаслідок власних відмов) буде призводити до зменшення кількості можливих рівнів (довжини ланцюга) деградації ПП. Таким чином, варіант БРД за двома параметрами деградації ПП та ЗР описуватиметься МФМ з «трикутником» розташуванням фрагментів (рисунок 7).



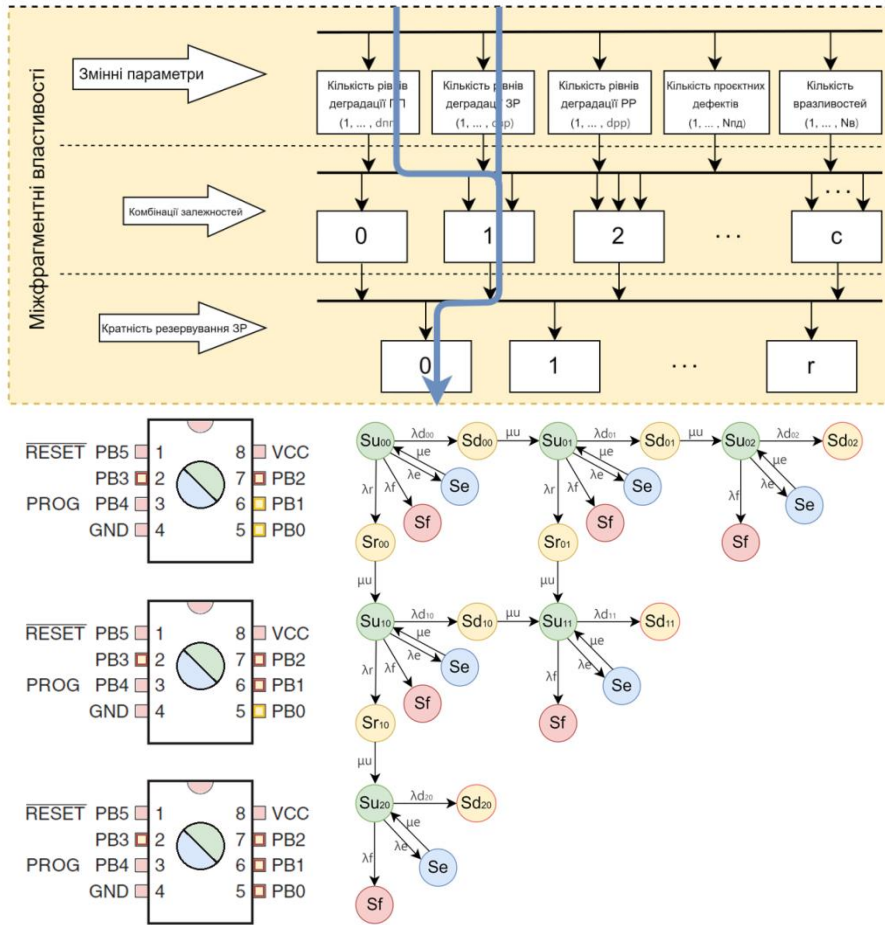


Рис. 7. Побудова трикутничкової МФМ ПП з БРД

У даному випадку ЗР може деградувати в межах своїх можливостей керування і/або повністю відмовити, що призведе до поведінки ПП, яка описуватиметься одним фрагментом, аналогічно ОФМ без реалізації РП.

Відповідно до представленої трикутничкової МФМ, існуючі стани в межах фрагменту набувають наступних змін:

- працездатні стани ( $Su_{ij}$ ) кожного з фрагментів нумеруються додатковим другим індексом відповідно до рівня деградації ЗР;
- стани деградації ( $Sd_{ij}$ ) та події деградації з відповідною інтенсивністю ( $\lambda d_{ij}$ ) мають індекси працездатних станів, для яких вони є похідними;
- для переходу між фрагментами, відповідно до деградації ЗР, в межах фрагменту позначається стан ( $Sr_{ij}$ ) та подія деградації ЗР з відповідною інтенсивністю  $\lambda r_{ij}$ . Відновлення після настання такого стану здійснюється також внаслідок події, яка характеризується інтенсивністю відновлення після реконфігурації  $\mu$ .

Для перевірки розроблених за допомогою класифікатора моделей проведемо симуляцію і обчислення функції готовності для ОФМ з потенційною РП та МФМ (рисунком 8).

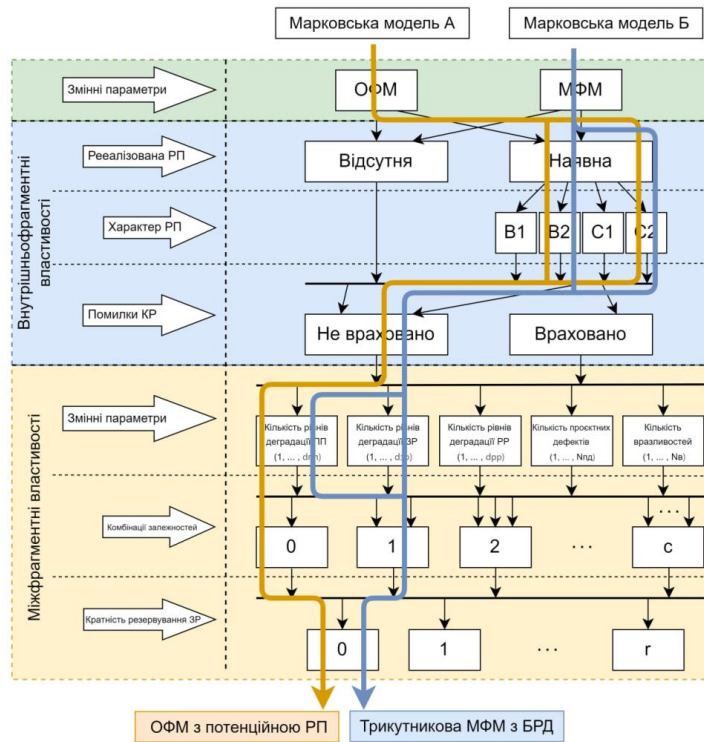


Рис. 8. Побудова МФМ ПП з БРД та ОФМ з потенційною РП

### Аналіз результатів моделювання

Після розроблення моделі (рисунок 8, модель Б) виконується її параметризація та визначаються значення інтенсивностей подій [4] для компонентів ПП (таблиця 1).

Таблиця 1.

Значення параметрів ПП при моделюванні

№	Параметр	Значення $\cdot 10^{-5}$ , 1/г
1	Інтенсивність відмови діода ( $\lambda_{\text{diод}}$ )	0.02
2	Інтенсивність відмови резистора ( $\lambda_{\text{рез}}$ )	0.01
3	Інтенсивність відмови мікроконтролера ( $\lambda_{\text{сінв}}$ )	0.002
4	Інтенсивність відмови контакту ( $\lambda_{\text{рпн}}$ )	$\lambda_{\text{рез}} + \lambda_{\text{діод}} = 0.03$
5	Інтенсивність першої деградації ( $\lambda_{\text{d}_0}$ )	$4 \cdot \lambda_{\text{рпн}} = 0.12$
6	Інтенсивність другої деградації ( $\lambda_{\text{d}_1}$ )	$3 \cdot \lambda_{\text{рпн}} = 0.09$
7	Інтенсивність третьої деградації ( $\lambda_{\text{d}_2}$ )	$2 \cdot \lambda_{\text{рпн}} = 0.06$
8	Інтенсивність відмови критичного елемента ( $\lambda_{\text{f}}$ )	$4 \cdot \lambda_{\text{рпн}} + \lambda_{\text{сінв}} = 0.122$
9	Інтенсивність відмови системи реконфігурації ( $\lambda_{\text{r}}$ )	$2 \cdot \lambda_{\text{рпн}} + \lambda_{\text{сінв}} = 0.062$
10	Інтенсивність збоїв ( $\lambda_{\text{е}}$ )	$8 \cdot \lambda_{\text{рпн}} + \lambda_{\text{сінв}} = 0.242$
11	Інтенсивність відновлення після збоїв ( $\mu_{\text{е}}$ )	$1/60 = 1600$
12	Інтенсивність відновлення після деградації ( $\mu_{\text{е}}$ )	$1/60 = 1600$
13	Кількість рівнів деградації ПП ( $d_{\text{пп}}$ )	2
14	Кількість рівнів деградації ЗР ( $d_{\text{зр}}$ )	2

Важливо зазначити, що кожен контакт складається з двох компонентів – додаткових резисторів і діодів. Тому інтенсивність відмов контакту ( $\lambda_{\text{рпн}}$ ) складається з інтенсивностей відмов діода ( $\lambda_{\text{діод}}$ ) і резистора ( $\lambda_{\text{рез}}$ ). У свою чергу, інтенсивність відмов контакту є базою для визначення інтенсивностей багаторівневої деградації ( $\lambda_{\text{d}_0}$ ,  $\lambda_{\text{d}_1}$ ,  $\lambda_{\text{d}_2}$ ), критичних відмов ПП, ЗР та збоїв ( $\lambda_{\text{f}}$ ,  $\lambda_{\text{r}}$ ,  $\lambda_{\text{е}}$ ).

Значення інтенсивностей відмови чіпу ( $\lambda_{\text{сінв}}$ ), відновлення після збоїв ( $\mu_{\text{е}}$ ) та реконфігурації ( $\mu_{\text{р}}$ ) взято з урахуванням параметрів, характерних для реальних чіпів. Результати симуляції представлено на графіках рисунку 9.

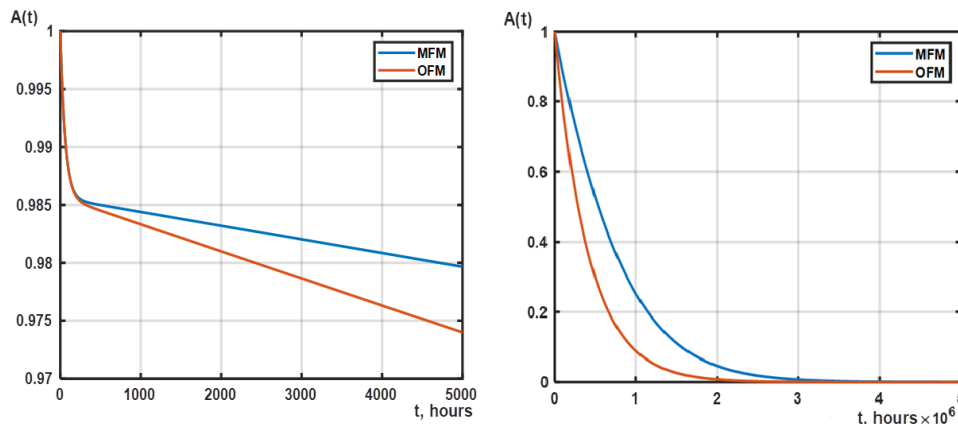


Рис. 9. Порівняння функцій готовності МФМ ПП з БРД та ОФМ з потенційною РП

В результаті короткострокової (до 5000 годин) та довгострокової (понад до млн. годин) симуляції було отримано дані для порівняння функції готовності для ПП з БРД та ПП з потенційною, але нереалізованою РП. В рамках короткострокової симуляції різниця функції готовності сягає 0.005 % (за показником неготовності виграш дорівнює 25%) і продовжила збільшуватися. Така динаміка показує, завдяки БРД виграш в готовності зростає зі збільшенням часу експлуатації ПП. Отже, такі методи побудови ПП з керованою деградацією доцільно використовувати в системах з довготривалим терміном використання або в умовах жорсткого зовнішнього середовища, коли інтенсивності відмов і збоїв можуть зростати у сотні разів і ущільнювати час. Тоді виграш від використання ПП з засобами реконфігурації, що забезпечують керовану БРД, буде суттєво зростати.

## ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

### І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Основним результатом дослідження є класифікація марковських моделей ПП з керованою багаторівневою деградацією, яка формує методичний базис для розроблення моделей з огляду на додаткові параметри, які необхідно враховувати для оцінки надійності і живучості залежно від множини та якості засобів контролю та реконфігурації. Розроблений класифікатор дозволяє сформувати і оновлювати множину моделей ПП відповідно до їх властивостей. Ця множина може доповнюватись шляхом впровадження нових ознак та сутностей.

Приклади багатфрагментних марковських моделей та результати їх дослідження надають змогу визначити етапи розроблення та особливості аналізу залежностей показників готовності від параметрів ПП та засобів реконфігурації при відмовах.

Подальші дослідження доцільно проводити за напрямками:

- впровадження в класифікатор ознак, які характеризують процеси забезпечення живучості ПП в умовах дії інформаційних та фізичних впливів середовища, та розроблення відповідних моделей, які враховують параметри таких впливів;
- врахування можливостей виникнення множинних відмов ПП при дослідженні їх надійнісної поведінки;
- розроблення програмного забезпечення для аналізу потенційної реконфігуропритатності програмовних пристроїв та її використання для мінімізації рівня деградації при відмовах.

## References

1. Bakhmach E., Andrashov A., Kharchenko V., Kovalenko A. Certification of RadICS platform under US NRC requirements / Proceeding of the 10th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies (NPIC & HMIT 2017), San Francisco, California, USA. June 11-15, 2017. Vol. 1. P. 2085-2092.
2. Kharchenko V., Zaitseva E., About degradable systems with degradable components / Radioelectronic and Computer Systems. 2010. № 7. P. 288-292. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs\\_2010\\_7\\_58](http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2010_7_58).
3. Zaitseva E., Levashenko V., Mysko V., Czapp S., Zhaxybayev D. Availability of UAV Fleet Evaluation Based on Multi-State System / *IEEE Systems Journal*. 2024. Vol. 12, P. 15290-15307, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3358198.
4. Vdovichenko O., Kharchenko V., Perepelitsyn A. Fault-tolerant Microcontroller Chip with Controlled Degradation: Models of Failures, Bootloader-based Reconfiguration and Dependability Assessment / 2024 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). Athens. Greece. 2024. P. 1-7.
5. Brezhnev E., Fesenko H., Kharchenko V., Levashenko V., Zaitseva E. MSS Models of Smart Grids with Multi-level Degradation and Recovery / In: Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (eds) *Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures. Studies in Systems, Decision and Control*. Springer. Cham. 2017. Vol 74. P.339-355. DOI: 10.1007/978-3-319-44162-7\_11.

6. Fesenko H., Illiashenko O., Kharchenko V., Kliushnikov I., Morozova O., Sachenko A., Skorobohatko S. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring / *Drones* 2023, №7:409. DOI: 10.3390/drones7070409.
7. Gantel L., Berthet Q., Amri E., Karlov A., Upegui A. Fault-Tolerant FPGA-Based Nanosatellite Balancing High-Performance and Safety for Cryptography Application / *Electronics*. 2021, №10:2148. DOI: 10.3390/electronics10172148.
8. Shaker M.N., Hussien A., Alkady G.I., Amer H.H., Adly I. FPGA-Based Reliable Fault Secure Design for Protection against Single and Multiple Soft Errors / *Electronics*. 2020, №9:2064. DOI: 10.3390/electronics9122064.
9. Yarzada R., Singh D., Al-Asaad H., A Brief Survey of Fault Tolerant Techniques for Field Programmable Gate Arrays / *2022 IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, Las Vegas, NV, USA. 2022. P. 823-828, DOI: 10.1109/CCWC54503.2022.9720746.
10. Liu G., Zhu Y., Guo W., Huang X. Fault-Tolerance-Oriented Physical Design for Fully Programmable Valve Array Biochips / *2023 60th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC)*, San Francisco, CA, USA, 2023, P. 1-6, DOI: 10.1109/DAC56929.2023.10247720.
11. Aly W. H. F., Al-Anazi A. M. A. Enhanced Controller Fault Tolerant (ECFT) model for Software Defined Networking / *2018 Fifth International Conference on Software Defined Systems (SDS)*, Barcelona, Spain. 2018. P. 217-222, DOI: 10.1109/SDS.2018.8370446.
12. Huang H., Wu W. HyperSFP: Fault-Tolerant Service Function Chain Provision on Programmable Switches in Data Centers / *NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, Budapest, Hungary. 2022. P. 1-9, DOI: 10.1109/NOMS54207.2022.9789756.
13. Strollo E., Trifiletti A. A fault-tolerant real-time microcontroller with multiprocessor architecture / *2016 MIXDES - 23rd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems*, Lodz, Poland. 2016. P. 431-436, DOI: 10.1109/MIXDES.2016.7529781.
14. Safari S. A Survey of Fault-Tolerance Techniques for Embedded Systems From the Perspective of Power, Energy, and Thermal Issues / *IEEE Systems Journal*. 2022. Vol. 10, P. 12229-12251, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3144217.
15. Lisnianski A., Levitin G. Multi-State System Reliability Assessment, Optimization and Applications / *Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics*. 2003. Vol 6, DOI: 10.1142/5221.
16. Zaitseva E., Levashenko V. Reliability analysis of multi-state system with application of multiple-valued logic / *Int. J. Quality Rel. Manage.* 2017. Vol. 34, № 6, pp. 862-878, DOI: 10.1108/ijqrm-06-2016-0081.
17. Kharchenko V. About systems with multistage degradation and recovery. *Information and control systems in railway transport*. 1997. № 1. P. 3-9.
18. Ahmed A. I., Said L. A., Madian A. H. Over-The-Air Firmware Updating Model suitable for Industrial IoT based on Microchip AVR MCU / *2021 IEEE 6th International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, Arad, Romania. 2021. P. 492-496, DOI: 10.1109/ICCCA52192.2021.9666279.