ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕМАТИЧНИХ МАШИН І СИСТЕМ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МУХА АРТЕМ АНДРІЙОВИЧ

УДК 004.05

ДИСЕРТАЦІЯ

МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ СТВОРЕННЯ ГАРАНТОЗДАТНИХ КЕРУЮЧИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ З ДВОКАНАЛЬНОЮ СТРУКТУРОЮ ОБРОБКИ ДАНИХ

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____

(підпис, ініціали та призвіще здобувача)

Науковий керівник Федухін Олександр Вікторович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Муха Ар.А. Моделі, методи та технічні засоби створення гарантоздатних керуючих комп'ютерних систем критичного призначення з двоканальною структурою обробки даних. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології – Інститут проблем математичних машин і систем Національної академії наук України, Київ, 2020.

У дисертації розв'язані нові актуальні задачі створення, дослідження, оцінювання та забезпечення гарантоздатності комп'ютерних систем.

Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків. Представлена робота відноситься до області теорії надійності і гарантоздатності комп'ютерних систем.

У першому розділі «Розробка атрибутивної моделі гарантоздатності комп'ютерних систем» розглядаються сучасні проблеми створення гарантоздатних комп'ютерних систем і приводяться висновки про необхідність застосування комплексного підходу до їх вирішення на платформі нової відмовостійкої двоканальної структури. Розділ містить розгорнутий аналіз основних характеристик (атрибутів) гарантоздатних комп'ютерних систем (КС), а саме: безвідмовність, готовність, обслуговуваність, живучість, достовірність, функціональна безпека, конфіденційність, цілісність із детальним описом їх метрик та методів кількісної оцінки. На основі удосконаленої атрибутивної моделі гарантоздатності КС (АМГКС), використовуючи метричний підхід, розроблено два аналітичних методи кількісної оцінки вагових коефіцієнтів гарантоздатної КС, що базуються на взаємовідношенні метрик

гарантоздатної системи. Для випадку, коли значення метрик мають якісні оцінки, запропоновано експертний метод оцінювання вагових коефіцієнтів.

Для аналітичного оцінювання рівня гарантоздатності комп'ютерних систем, у цілому, запропоновано математичну модель у вигляді функціоналу обґрунтованого виду.

Завдяки розгляду атрибутивної моделі гарантоздатності, як сукупності метричних показників розроблено метод порівняльної оцінки комп'ютерних систем із боку досягнутого рівня гарантоздатності різних варіантів їх виконання у процесі проектування. Розроблено скалярну математичну модель кількісного оцінювання загального рівня гарантоздатності КС.

Описано основні методи забезпечення гарантоздатності.

У другому розділі «Розробка та аналіз відмовостійкої комп'ютерної системи з квазімістковою структурою» проведено дослідження властивостей відмовостійких систем, що дозволило використовувати стратегію відмовобезпеки як альтернативу дорогої стратегії повної відмовостійкості при проектуванні гарантоздатних КС.

В розділі описано підхід щодо розробки відмовостійких комп'ютерних систем для випадку, коли створювана система являє собою критичну інфраструктуру та має можливість при виникненні будь-якої одиночної відмови призупинення виконання своєї функції (повністю або частково) без переходу у критичний стан. Таким чином, повна відмовостійкість змінюється на часткову відмовостійкість, а саме відмовобезпеку, що надає змогу проектувати більш ефективні системи критичного призначення.

Розроблено основні вимоги до програмного забезпечення відмовостійких комп'ютерних систем і доведено можливість досягнення високого ступеня захищеності керуючих програм щодо програмних помилок і відмов апаратних засобів завдяки використанню методів попередження, виявлення та забезпечення стійкості до помилок.

Удосконалено класифікацію двоканальних відмовостійких структур комп'ютерних систем, показано переваги і недоліки кожної з розглянутих

структур з логічною функцією відновлюючого органа "І". З метою підвищення експлуатаційної готовності існуючих структур розроблено нову квазімісткову самовідновлюючу двоканальну структуру з реконфігурацією при відмовах складових частин, що складається із рівнонадійних дубльованих вузлів з відновлюючими органами, які мають функцію "І/АБО".

Доведено, що завдяки декомпозиції функціональних блоків на рівнонадійні частини та додаванням схем контролю і реконфігурації можливо підвищити загальний рівень ймовірності безвідмовної роботи системи у цілому. Квазімісткова структура легко масштабується в напрямі зростання кількості дубльованих вузлів і має високий потенціал застосування при побудові безвідмовних систем підвищеної готовності.

У галузі створення комп’ютерних систем із підвищеною живучістю, продемонстровано застосування принципу інфраструктурного резервування та топологічної оптимізації на прикладі використання квазімісткової структури при побудові системи протиаварійної автоматики гідроелектростанцій. Розроблено кластерну структуру високої живучості, що має значні перспективи при розробці живучих кластерних систем критичного призначення.

У розділі продемонстровано, що принцип дихотомії, покладений в основу розробки КМС, легко масштабується під різні умови і має високий потенціал застосування при побудові безвідмовних і відмовостійких систем підвищеної безвідмовності, готовності і безпеки.

У третьому розділі «Забезпечення безвідмовності відмовостійких комп’ютерних систем» проведено дослідження надійності і достовірності функціонування квазімісткової структури, показано її переваги перед іншими двоканальними структурами. Це підтверджено проведенням аналітичних розрахунків декількома методами та шляхом статистичного моделювання.

Аналіз отриманих результатів моделювання відновлювальної КМС дозволив зробити такі висновки:

- середній наробіток до першої відмови квазімісткової структури інтенсивно зростає зі зменшенням часу відновлення і має невелику тенденцію до збільшення з ростом кількості вузлів при фіксованому часі відновлення;

- ймовірність безвідмовної роботи квазімісткової структури зростає зі зменшенням часу відновлення і також зростає при збільшенні кількості вузлів;

- коефіцієнт варіації наробітку до першої відмови квазімісткової структури знижується зі зменшенням часу відновлення і зростанням кількості вузлів.

Статистичне моделювання надійності продемонструвало, що надійність квазімісткової структури з відновленням збільшується зі зростанням кількості вузлів.

Виконано оцінювання достовірності функціонування квазімісткової структури з використанням оригінальної феноменологічної моделі, що продемонструвало її переваги перед іншими двоканальними резервованими структурами.

У четвертому розділі «Мікропроцесорна контрольно-інформаційна система для залізничних переїздів «Благовіст»» розглядаються проблеми аварійності на залізничних переїздах. Приводяться їх рішення завдяки впровадженню контрольно-інформаційних систем нового зразка, що базуються на інформаційному підході, який дозволяє підвищити безпеку руху автомобільного транспорту через залізничні переїзди.

У рамках конкурсу науково-технічних проектів наукових установ НАН України в ІПММС НАН України створено дослідний зразок системи і здійснено випробування гарантоздатної Контрольно-інформаційної системи для залізничних переїздів «Благовіст» у Центрі випробувань і сертифікації технологій та засобів обчислювальної техніки та автоматизації (ЦВС ТЗОТА) при ІПММС НАН України, що підтвердило її високий рівень працездатності.

Враховуючи сучасні вимоги до такого типу систем, проведено структурний синтез системи «Благовіст», розроблено алгоритмічну, програмну та апаратну частини, що реалізують методи забезпечення гарантоздатності.

Отримані теоретичні результати досліджень та практично підтверджені прикладні методи побудови гарантоздатних комп'ютерних засобів і систем, що мають міжгалузеву направленість і можуть бути впроваджені при розробці й проектуванні конкурентоздатних вітчизняних інформаційних і керуючих комп'ютерних систем щодо критичних технологій та інфраструктур.

Ключові слова: гарантоздатність, відмовостійкість, відмовобезпека, атрибутивна модель гарантоздатності, квазімісткова структура, кількісна оцінка рівня гарантоздатності.

ABSTRACT

Mukha Ar. A. Models, methods and technical means of the creation of reliable controllers of critical application computer systems with two-channel data structure. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.13.06 – Information Technologies – Institute of Problems of Mathematical Machines and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation addresses the new current tasks of creating, maintaining and evaluating the computer systems' security.

The work consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of references and five applications. The presented work relates to the field of computer systems warranty theory.

The first section "Development of an attributive model of computer systems warranty" considers the current problems of creating computer systems and provides conclusions about the need for an integrated approach to their solution on the platform of a new fault-tolerant two-channel structure. The section contains a detailed analysis of the main characteristics (attributes) of guaranteed computer systems (CS), namely: reliability, readiness, serviceability, survivability, reliability, functional security, confidentiality, integrity with a detailed description of their metrics and methods of quantification. Based on the improved attributive model of CS guarantee capacity (AMGKS), using the metric approach, two analytical methods of quantitative estimation of weight coefficients of the guarantee CS based on the relationship of the metrics of the warranty system have been developed. For the case when the values of metrics have qualitative estimates, an expert method of estimating weights is proposed.

For the analytical assessment of the level of warranty of computer systems, in general, a mathematical model in the form of a functional of a reasonable form is proposed.

By considering the attributive model of warranty as a set of metrics, a method of comparative evaluation of computer systems by the achieved level of warranty of different options for their implementation in the design process. A scalar mathematical model of quantitative assessment of the general level of warranty capacity of the CS has been developed.

The main methods of ensuring warranty are described.

In the second section "Development and analysis of a fault-tolerant computer system with a quasi-bridge structure" a study of the properties of fault-tolerant systems, which allowed to use the failure-safe strategy as an alternative to an expensive strategy of complete fault-tolerance in designing warranty.

This section describes an approach for developing fault-tolerant computer systems for the case where the system being created is a critical infrastructure and has the ability to suspend its function (in whole or in part) without going into a critical state in the event of any single failure. Thus, full fault tolerance changes to

partial fault tolerance, namely, fault tolerance, which allows to design more efficient critical purpose systems.

The basic software requirements for fault-tolerant computer systems have been developed and the possibility of achieving a high degree of protection of control programs against software errors and hardware failures through the use of methods to prevent, detect and ensure fault tolerance has been proven.

The classification of two-channel fault-tolerant structures of computer systems is improved, the advantages and disadvantages of each of the considered structures with the logical function of the restorative organ "I" are shown. In order to increase the operational readiness of existing structures, a new quasi-capacitive self-healing two-channel structure with reconfiguration in case of failure of components has been developed, consisting of equally reliable duplicate units with restorative bodies with "AND / OR" function.

It is proved that due to the decomposition of functional blocks into equally reliable parts and the addition of control and reconfiguration schemes, it is possible to increase the overall level of probability of trouble-free operation of the system as a whole. The quasi-capacitive structure easily scales in the direction of increasing the number of duplicate nodes and has a high potential for use in the construction of faultless high-availability systems.

In the field of computer systems with high survivability, the application of the principle of infrastructure redundancy and topological optimization is demonstrated on the example of the use of a quasi-bridge structure in the construction of a system of emergency automation of hydroelectric power plants. A cluster structure of high survivability has been developed, which has significant prospects in the development of viable cluster systems for critical purposes.

The section demonstrates that the dichotomy principle underlying the development of CMS is easily scalable under different conditions and has a high potential for use in the construction of faultless and fault-tolerant systems of high reliability, readiness and safety.

The third section "Ensuring the reliability of fault-tolerant computer systems" conducted a study of the reliability and reliability of the quasi-bridge structure, showing its advantages over other two-channel structures. This is confirmed by analytical calculations by several methods and by statistical modeling.

The analysis of the obtained results of modeling of restorative CMS allowed to draw the following conclusions:

- the average operating time before the first failure of the quasi-bridge structure increases intensively with decreasing recovery time and has a slight tendency to increase with increasing number of nodes at a fixed recovery time;

- the probability of failure-free operation of the quasi-bridge structure increases with decreasing recovery time and also increases with increasing number of nodes;

- the coefficient of variation of the operating time before the first failure of the quasi-bridge structure decreases with decreasing recovery time and increasing the number of nodes.

Statistical reliability modeling has shown that the reliability of a quasi-bridge structure with recovery increases with the number of nodes.

The reliability of the functioning of the quasi-capacitive structure was evaluated using the original phenomenological model, which demonstrated its advantages over other two-channel redundant structures.

In the fourth section "Microprocessor control and information system for railway crossings" Blagovist "" the problems of accidents at railway crossings are considered. Their solutions are given due to the introduction of a new type of control and information systems based on the information approach, which allows to increase the safety of road transport through railway crossings.

Within the framework of the competition of scientific and technical projects of scientific institutions of NAS of Ukraine in IPMMS of NAS of Ukraine the prototype of system is created and tests of the guaranteeable Control and information system for railway crossings "Blagovist" in the Center of tests and

certification of technologies and means of computer equipment and automation. IPMMS of the NAS of Ukraine, which confirmed its high level of efficiency (Appendix A, p. A.1, A. 2).

Taking into account modern requirements for this type of systems, a structural synthesis of the Blagovest system has been carried out, algorithmic, software and hardware parts have been developed that implement methods of ensuring warranty capacity.

Theoretical results of researches and practically confirmed applied methods of construction of capable computer means and systems that have interdisciplinary orientation and can be implemented at development and designing of competitive domestic information and control computer systems concerning critical technologies and infrastructures are practically confirmed.

Keywords: dependability, fault-tolerance, fail safety, attributive model of dependability, quasi-bridge structure, quantitative assessment of the level of dependability.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Муха Ар.А. Управление процессом разработки сложных технических систем и процессов, особенности применения FMEA-анализа. *Математичні машини і системи.* 2012. № 2. С. 168–176.
2. Муха Ар.А. Моделирование и разработка алгоритма работы АПС-РМПГ средствами пакета Matlab Similink+ Statefolw. *Молодий вчений*. 2014. № 5 (8). С. 10–14.
3. Муха Ар.А. К вопросу о живучести систем противоаварийной автоматики на гидроэлектрических станциях. *Молодий вчений*. 2018. № 3 (55). С. 399–405.
4. Муха Ар.А. Практические аспекты гарантоспособности контрольно-информационной системы для железнодорожных переездов «Благовест». *Математичні машини і системи*. 2018. № 4. С. 109–116.
5. Федухин А.В., Муха Ар.А., Муха А.А. ПЛИС-системы как способ повышения отказоустойчивости информационно-управляющих комплексов. *Математичні машини і системи.* 2010. № 1. С. 198–204.
6. Федухин А.В., Муха Ар.А. К вопросу об аппаратной реализации избыточных структур. Резервирование цифровых функциональных блоков. *Математичні машини і системи.* 2010. № 2. С. 138–143.
7. Федухин А.В., Муха Ар.А. К вопросу об аппаратной реализации избыточных структур: резервированная двухканальная система с реконфигурацией. *Математичні машини і системи.* 2010. № 4. С. 156–159.
8. Федухин А.В., Муха Ар.А. Имитационное моделирование отказоустойчивой резервированной двухканальной системы в интегрированной инструментальной среде Matlab Simulink. *Математичні*

машини і системи. 2011. № 2. С. 178–181.

9. Федухин А.В., Гладков А.В., Муха Ар.А. Новый подход к автоматизации переездов на железнодорожном транспорте. *Математичні машини і системи.* 2011. № 3. С. 135–141.

10. Муха Ар.А., Пасько В.П. Структурный синтез отказоустойчивых компьютерных систем. *Математичні машини і системи.* 2013. № 2. С. 202–206.

11. Федухин А.В., Ярошенко В.Н., Сухомлин А.И., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. К вопросу о сравнительной оценке гарантоспособных систем. *Математичні машини і системи.* 2014. № 1. С. 185–194.

12. Федухин А.В., Муха Ар.А. Радиомикропроцессорные информационные системы для железнодорожных переездов серии «Благовест». *Математичні машини і системи.* 2014. № 2. С. 137–141.

13. Федухин А.В., Муха Ар.А. Беспроводные микропроцессорные системы для железнодорожных переездов серии «Благовест». *Молодий вчений.* 2014. № 11. С. 16–19.

14. Федухин А.В., Муха Ар.А. Беспроводные микропроцессорные системы для железнодорожных переездов серии «Благовест». *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* 2015. № 2. С. 1–5.

15. Федухин А.В., Ярошенко В.Н., Муха Ар.А. К вопросу о взаимосвязи величин метрик и их весов. *Математичні машини і системи.* 2015. № 3. С. 191–200.

16. Федухин А.В., Муха Ар.А. Информационный подход к повышению безопасности движения по железнодорожным переездам. *Математичні машини і системи.* 2015. № 4. С. 145–151.

17. Федухин А.В., Пасько В.П., Муха Ар.А. К вопросу моделирования надежности, восстанавливаемой квазимостиковой структуры с учетом тренда параметров надежности составных частей. *Математичні машини і системи.* 2016. № 1. С. 158–167.

18. Федухин А.В., Муха Ар.А. Стратегия отказобезопасности как альтернатива полной отказоустойчивости при проектировании гарантоспособных компьютерных систем. Ч. 1. *Молодий вчений.* 2016. № 8 (35). С. 169–173.

19. Федухин А.В., Муха Ар.А. Стратегия отказобезопасности как альтернатива полной отказоустойчивости при проектировании гарантоспособных компьютерных систем. Ч. 2. *Молодий вчений*. 2016. № 10 (37). С. 23–27.

20. Федухин А.В., Муха Ар.А., Сеспедес Гарсия Н.В. Доказательство безопасности компьютерных систем. *Математичні машини і системи.* 2016. № 3. С. 93–101.

21. Федухин А.В., Ярошенко В.Н., Муха Ар.А. О важных следствиях из формулы DN-распределения наработки до отказа. *Молодий вчений.* 2016. №11 (38). С. 42–46.

22. Федухин А.В., Лутов С.Д., Сеспедес Гарсія Н.В., Ґедз О.В., Муха Ар.А. Система інформаційного сповіщення для залізничних переїздів «Благовіст». *Наука та Інновації.* 2017. № 13 (2). С. 29-35; Fedukhin A.V., Lutov S.D., Cespedes Garcia N.V., Gedz A.V., Mukha Ar. A. Blagovist: Information Warning System for Railroad Crossings. *Science and Innovation.* 2017. N 13 (2). P. 27–32.

23. Федухин А.В., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. К вопросу о связи надежности и достоверности функционирования компьютерных систем. *Математичні машини і системи.* 2017. № 2. С. 145–155.

24. Федухин А.В., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. К вопросу о надежности невосстанавливаемой системы с квазимостиковой структурой элементов. *Математичні машини і системи.* 2017. № 4. С. 160–168.

25. Федухин А.В., Муха Ар.А. Обеспечение живучести систем противоаварийной автоматики ГЭС. *Математичні машини і системи.* 2018. № 2. С. 169–194.

26. Федухин А.В., Стрельников В.П., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. Приближенная оценка надежности восстанавливаемых изделий на этапе эскизного проектирования. *Математичні машини і системи.* 2018. №3. С. 149–155.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

27. Mukha Ar.A. Develoment of safety FPGA-based systems for automatic crossing signals for lavel crossing. *Strategy of Quality in Indastry and Education:* IX international conference (Varna, Bulgary, 2013). Varna, 2013. Vol. 1. P. 345–346.

28. Муха Ар.А. Гарантоспособность компьютерных систем – способность предоставлять требуемые услуги с высоким уровнем доверия. *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища INUDECO 18:* тези доп. III міжнар. конф. (м. Славутич, 25-27 квітня 2018 р.). Славутич, 2018. С. 258–265.

29. Федухин А.В., Муха Ар.А. Имитационное моделирование отказоустойчивой резервированной двухканальной системы в интегрированной инструментальной среде Matlab Simulink. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС -2010:* тези доп. 5-ої наук.-практ. конф. з міжнар. участю (м. Київ, 25-29 червня 2010 р.). Київ, 2010. С. 225–226.

30. Федухин А.В., Муха Ар.А. Структурный синтез отказоустойчивых компьютерных систем. *Актуальні питання розвитку технічних наук в умовах глобальної нестабільності:* тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 13-14 квітня 2013 р.). Київ, 2013. С. 61–64.

31. Ґедз О.В., Муха Ар.А. Моделирование работы и отладка алгоритма функционирования контрольно-информационной системы для

железнодорожных переездов «Благовест». *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС-2016:* тези доп. 11-ої наук.-практ. конф. з міжнар. участю (м. Київ, 25-29 червня 2016 р.). Київ, 2016. С. 246–247.

32. Федухин А.В., Муха Ар.А., Сеспедес Гарсия Н.В. Моделирование и аналитическая оценка надежности квазимостиковой структуры. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС-2017:* тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 25–29 червня 2017 р.). Чернігів, 2017. С. 282–288.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ…… **5**

ВСТУП…… **6**

РОЗДІЛ І РОЗРОБКА АТРИБУТИВНОЇ МОДЕЛІ ГАРАНТОЗДАТНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ…….…….. **14**

1.1 Онтологія гарантоздатності КС…… 14

1.2 Гарантоздатність КС…… 20

1.3 Атрибути гарантоздатних КС ……..…… 22

1.3.1 Атрибут безвідмовність…….....…… 22

1.3.2 Атрибут готовність …… 25

1.3.3 Атрибут обслуговуваність …… 26

1.3.4 Атрибут живучість …… 27

1.3.5 Атрибут достовірність…… 28

1.3.6 Атрибут функціональна безпека……...…… 29

1.3.7 Атрибут конфіденційність…….....…… 30

1.3.8 Атрибут цілісність……..…… 31

1.4 Атрибутивна модель гарантоздатності КС…….…… 32

1.5 Кількісна оцінка вагових коефіцієнтів метрик ГКС……..…… 34

1.5.1 Експертний метод…….…… 34

1.5.2 Аналітичний метод…….....…… 35

1.6 Порівняльна оцінка КС за рівнем гарантоздатності ……..…… 54

1.6.1 Випадок кількісних метрик……..…… 56

1.6.2 Випадок якісних метрик……...…… 57

1.6.3 Рішення про перевагу систем……..…… 58

1.7 Кількісна оцінка рівня гарантоздатності КС……...…… 60

1.7.1 Скалярна модель гарантоздатності системи……...…… 61

1.8 Методи забезпечення гарантоздатності …….…… 68

1.9 Висновки до розділу 1……...…… 74

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ВІДМОВОСТІЙКОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ З КВАЗІМІСТКОВОЮ СТРУКТУРОЮ … 75

2.1 Стратегія відмовобезпеки як альтернатива повній відмовостійкості КС …... 75

2.1.1 Відмовостійкість ..……... 75

2.1.2 Відмовобезпека ..……..…… 77

2.1.3 Концепція безпеки комп'ютерних систем ..……..... 79

2.1.4 Критерії небезпечних відмов ……. 81

2.2 Класифікація двоканальних відмовостійких структур КС ……..... 82

2.2.1 Вимоги до відмовостійких і відмовобезпечних структур КС……... 83

2.2.2 Дубльована система з перевіркою……..... 84

2.3 Вимоги до програмного забезпечення відмовостійких КС …….. 86

2.3.1 Структура програмного забезпечення …….. 86

2.3.2 Основні принципи забезпечення надійності та безпеки програмного забезпечення ……... 86

2.4 Квазімісткова структура з реконфігурацією ..…… 91

2.4.1 Опис та аналіз вихідної функції КМС ……..... 91

2.4.2 Структурна схема надійності КМС ……..... 94

2.4.3 Приклад апаратної реалізації КМС …… 95

2.4.4 Квазімісткова структура кластерного типу ……... 98

2.5 Висновки до розділу 2 …….. 103

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ……..... 105

3.1 Дослідження надійності КМС ……. 105

3.1.1 Порівняльна оцінка надійності КМС з класичною дубльованою структурою стандартизованим методом ……..……. 105

3.1.2 Порівняльна оцінка надійності КМС із структурами змішаного дублювання …….……. 107

3.1.3 Дослідження надійності КМС ЙФ-методом ……..……. 113

3.1.4 Дослідження надійності КМС класичним методом ……..……. 116

3.2 Дослідження надійності КМС методом статистичного моделювання …… 121
3.2.1 Пакет програм RELIABmod v.2.0……. 121
3.2.2 Моделювання надійності невідновлюваної КМС …… 123
3.2.3 Моделювання надійності відновлюваної КМС……..……. 128
3.3 Дослідження достовірності функціонування КМС ……..…… 134
3.4 Висновки до розділу 3 ……..…… 144
РОЗДІЛ 4 ГАРАНТОЗДАТНА МІКРОПРОЦЕСОРНА КОНТРОЛЬНО-ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕЇЗДІВ «БЛАГОВІСТ»…… 146
4.1 Інформаційний підхід до забезпечення безпеки на залізничних переїздах … 146
4.2 Структурна схема КІС……..……. 149
4.3 Елементний базис КІС …….……. 154
4.4 Алгоритмічне забезпечення КІС ……..……...…… 155
4.4.1 Логіка роботи ЛП ……...…… 155
4.4.2 Логіка роботи ЦП …….....…… 157
4.4.3 Режими роботи інформаційного табло …… 158
4.5 Програмне забезпечення КІС ……..……. 159
4.6 Методи забезпечення гарантоздатності КІС ……..…… 160
4.7 Напрями майбутнього вдосконалення КІСЗП …….……. 165
4.8 Висновки до розділу 4 …….……. 166
ВИСНОВКИ ……...…… 167
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 169
ДОДАТКИ …….....…… 181
Додаток А Акти впровадження…….……. 181
Додаток Б Список публікацій здобувача за темою дисертації……... 190
Додаток В Кількісна оцінка рівня гарантоздатності, класифікація КС та моделювання і розрахунки надійності…….. 194
Додаток Д Таблиці *DN*-розподілу …….…… 218
Додаток Е Елементний базис КІСЗП «Благовіст»……... 230

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АПС – автоматична переїзна сигналізація.

АТЗ – автотранспортний засіб.

АМГКС – атрибутивна модель гарантоздатності комп’ютерних систем.

БСП – безпечна схема порівняння.

ЙФ – ймовірнісно-фізичний.

ЙБР – ймовірність безвідмовної роботи.

ГКС – гарантоздатна комп’ютерна система.

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина.

КІСЗП – контрольно-інформаційна система для залізничних переїздів.

КМС – квазімісткова структура.

КД – колійний датчик.

КІ – критична інфраструктура.

КС – комп’ютерні системи.

ЛП – лічильний пункт.

МК – мікроконтролер.

ІТ – інформаційні технології.

ПЗ – програмне забезпечення.

ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема.

РГС – рівень гарантоздатності.

СДК – система диспетчерського контролю.

ССН – структурна схема надійності.

СВК – схема внутрішнього контролю.

СПА – система протиаварійної автоматики.

ЦП – центральний пункт.

ФСБ – функціональний субблок.

ФБ – функціональний блок.

DN – дифузійний немонотонний розподіл.

ВСТУП

Актуальність теми. У зв’язку зі стрімким розвитком інформаційних технологій (ІТ) сучасне суспільство стає все більш залежним від якості послуг, що надаються. Важливою складовою такої залежності є рівень надійності і безпеки сервісів і систем, що базуються на ІТ. Це обумовлено тим, що недостатній рівень надійності та безпеки комп'ютерних систем (КС) як засобів, що реалізують ІТ, призводить або до матеріальних втрат і зниження конкурентоспроможності, або до більш серйозних наслідків, пов'язаних із загибеллю людей, техногенними та екологічними катастрофами при експлуатації КС у системах критичного призначення. На сьогоднішній день важко знайти область людської діяльності, де б не були потрібні КС високої надійності і безпеки. Це, в першу чергу, енергетика, транспорт, космос, військово-промисловий комплекс, медицина, фінанси і т.д.

Узагальненою властивістю таких систем є властивість гарантоздатності (dependability), базовою платформою якої є відмовостійкість, а атрибутами – безвідмовність, готовність, обслуговуваність, живучість, достовірність, безпека, конфіденційність і цілісність. Іншими словами, гарантоздатні системи – це відмовостійкі, високонадійні, безпечні та живучі системи з гарантовано достовірними обчисленнями. Для сервіс-орієнтованих КС властивість гарантоздатності можна сформулювати, як здатність КС надавати необхідні послуги, яким можна виправдано довіряти.

Складність і масштабність вирішення проблеми забезпечення гарантоздатності КС ставить принципово нові завдання з організації істотно більш ефективних відмовостійких архітектурних рішень, реалізації нових підходів щодо забезпечення високої надійності, живучості та безпеки, розробки нових методів і засобів прогнозування, діагностики та самоконтролю програмних і апаратних засобів, розвитку комплексних технологій автоматизації проектування, статистичного та імітаційного моделювання.

На цей час над вирішенням проблем розробки гарантоздатних інформаційно-керуючих КС спеціального та критичного призначення працює значна кількість учених, цьому питанню присвячено багато наукових робіт, проводяться профільні наукові конференції, фінансуються державою відповідні дослідження науково-дослідних, навчальних університетів та інститутів. У ряді промислово розвинених країн світу вимоги до гарантоздатності КС, що керують і забезпечують життєдіяльністю суспільства, стають національними пріоритетами розвитку ІТ найвищого рівня, регулярно оновлюються відповідні стандарти у сфері гарантоздатності, надійності та безпеки.

У роботі розглянуто створення базових методів інжинірингу КС спеціального призначення, основною галуззю застосування яких є управління об'єктами критичних інфраструктур і технологій, а саме, військова сфера, транспорт, енергетика та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Результати дисертаційної роботи були отримані в ІПММС НАН України в межах держбюджетних науково-дослідних тем: "Розробка теоретичних засад створення та дослідження живучих гарантоздатних систем керування, на основі ймовірнісно-фізичного підходу, шифр "Живучість", номер державної реєстрації теми 0110 U001005 (2010-2014 рр.); «Розробка теоретичних основ і прикладних методів створення комп'ютерних засобів і систем із гарантованою надійністю і безпекою для критичних технологій і інфраструктур», шифр "Безпека", номер державної реєстрації теми 0115U000035 (2015-2019 рр.).

Дослідження виконувались і виконуються сьогодні відповідно до Пріоритетного напряму розвитку науки і техніки в Україні «Інформаційні та комунікаційні технології, включаючи розвиток нових апаратних рішень для перспективних засобів обчислювальної техніки, інформаційних та комунікаційних технологій, розробку базових компонент та комплексів керування складними системами», «Розробка і дослідження моделей і методів оцінки якості і підвищення надійності, функціональної безпеки і живучості керуючих систем, а також інформаційних технологій для створення гарантоздатних автоматизованих систем

обробки інформації та управління критичного застосування» паспорта спеціальності 05.13.06 – інформаційні технології.

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є розробка моделей, методів і технічних засобів для проектування ефективних гарантоздатних КС із мінімальною надлишковістю на основі двоканальної обробки даних щодо використання у критичних інфраструктурах і технологіях.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі передбачається вирішення таких завдань:

1. Удосконалення атрибутивної моделі гарантоздатності КС, на основі якої стане можливим проведення її параметризації (кількісної оцінки атрибутів і метрик).

2. Розробка методів обчислення кількісної оцінки загального рівня гарантоздатності КС та проведення порівняльної оцінки КС за загальним рівнем гарантоздатності.

3. Здійснення аналізу і класифікації за властивостями надійності, безпеки, ефективності використання відмовобезпечних структур КС із двоканальною обробкою даних. На основі отриманих результатів проведення структурного синтезу і аналізу нового класу двоканальних КС із квазімістковою структурою (КМС) та реконфірацією у процесі функціонування.

4. Проведення аналізу ефективності методів інфраструктурного резервування і оптимізації на основі КМС як напряму забезпечення високого рівня функціональної безпеки і живучості.

5. Розробка гарантоздатної мікропроцесорної контрольно-інформаційної системи для залізничних переїздів.

Об’єктом дослідження є процеси інжинірингу (розробки, аналізу та порівняння) сучасних керуючих комп’ютерних систем критичного призначення, що забезпечують високий рівень гарантоздатності.

Предметом дослідження є методи і засоби забезпечення високого рівня гарантоздатності керуючих КС критичного призначення із двоканальною обробкою даних.

Методи дослідження. У відповідності з метою та зазначеними завданнями використовувалися основні положення таких теорій, як гарантоздатності комп'ютерних систем, надійності цифрових схем і систем, теорія ймовірностей і математичної статистики; методологія математичного та статистичного моделювання, методи булевої алгебри та ін.

Перевірка правильності теоретичних пропозицій здійснюється методами аналітичних розрахунків, проведення комп'ютерних експериментів шляхом моделювання та порівнянням цих методів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- вдосконалено АМГ КС та здійснено розгорнуту декомпозицію її понять на атрибути, метрики і критерії рівня реалізації, яка відрізняється від відомих включеним до її складу атрибутом достовірність, аналітичних оцінок кількісних метрик та критеріїв реалізації якісних метрик, що надає можливості дослідження й управління гарантоздатністю КС;

- вперше розроблено метод кількісного оцінювання рівня реалізації атрибутів, метрик та критеріїв рівня реалізації, що дозволяє здійснити параметризацію АМГ. Завдяки цьому розроблено скалярну математичну модель комплексного оцінювання загального рівня гарантоздатності КС та реалізовано процедуру порівняльної оцінки КС з боку досягнутого рівня гарантоздатності для різних варіантів їх виконання в період проектування. Такий метод, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати аналітичне оцінювання рівня гарантоздатності та робити вибір варіантів реалізації гарантоздатної КС при її інжинірингу;

- вперше на основі аналізу та класифікації відмовобезпечних структур КС із двоканальною структурою обробки даних запропоновано новий клас двоканальної КС із квазімістковою структурою та можливістю реконфігурації при відмовах її складових частин, що дозволяє створювати відмовобезпечі і відмовостійкі КС підвищеної надійності, безпеки і живучості з мінімальною надмірностю технічних засобів. Завдяки аналітичним розрахункам та статистичному моделюванню надійності КМС, показано переваги запропонованої структури з боку надійності та достовірності від 10 до 30 % перед класичною дубльованою структурою;

- дістала подальшого розвитку стратегія відмовобезпеки як альтернатива дорогої стратегії повної відмовостійкості при проектуванні гарантоздатних КС за рахунок встановлення критеріїв небезпечних відмов та захисних станів, які використовуються при доказі безпеки КС і дозволяють створювати ефективні реалізації КС без втрати безпеки функціонування;

- набув подальшого розвитку метод інжинірингу безпечної КС із високим рівнем живучості на основі КМС кластерного типу, що дозволяє підвищити безпеку і живучість КС розподіленого типу з розвиненою топологією в декілька разів.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані теоретичні результати досліджень і практично підтверджені прикладні методи побудови гарантоздатних комп'ютерних засобів і систем мають міжгалузеву направленість та можуть бути впроваджені при розробці й проектуванні конкурентоздатних вітчизняних керуючих КС із двоканальною структурою обробки даних щодо критичних технологій та інфраструктур.

Потенційний економічний ефект від впровадження результатів наукових досліджень полягає у зменшенні витрат на роботи спеціалістів по проведенню ремонтів та технічному обслуговуванню складових частин гарантоздатних систем завдяки введенню функцій відмовостійкості, самодіагностики і самовідновлення та ін. Також практичним чинником є скорочення збитків від простоїв із причини відмов обладнання за рахунок високої надійності і готовності систем.

У межах конкурсу науково-технічних проектів наукових установ НАН України в ІПММС НАН України було проведено структурний синтез, технічне проектування та виготовлення з використанням методів забезпечення гарантоздатності дослідного зразка «Контрольно-інформаційної системи для залізничних переїздів (КІСЗП) «Благовіст»». Система «Благовіст» забезпечує зменшення аварійних ситуацій на залізничних переїздах за рахунок повної інформованості водіїв автотранспорту про ситуацію на переїзді. Основною відмінністю інноваційної системи є надання водіям інформації про: наближення моменту закриття автоматичного шлагбауму (за наявності); зайнятість потягом ділянки наближення до переїзду; напрямок руху поїзду через переїзд; швидкість

руху поїзду, що наближається; час, що залишився до проходження потягу по переїзду; вільність контрольної ділянки за переїздом; ситуація на переїзді у вигляді інформаційної стрічки, що біжить.

Розробка системи проводилася у співпраці з Департаментом автоматики, телемеханіки і зв'язку Укрзалізниці та Державним науково-дослідним центром залізничного транспорту України. Виконання іноваційного проекту було підтримано Національним транспортним університетом та департаментом ДАІ МВС України, які дали згоду на обладнання залізничних переїздів. Отримано дозвіл на встановлення дослідного зразка системи на магістральній ділянці у гірскій місцевості залізних доріг Грузії

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок полягає в розробці нових методів, алгоритмів і програм, що забезпечують розв'язання поставлених задач. Основні результати роботи одержані автором особисто.

У роботі [1] запропоновано для управління процесом розробки систем використовувати FMEA-аналіз. У роботі [2] запропоновано здійснювати дослідження алгоритмів функціонування відмовостійких систем засобами імітаційного моделювання в інструментальному середовищі Matlab Simulink. У роботі [3] описано вирішення задачі підвищення живучості систем протиаварійної автоматики, запропоновано принцип інфраструктурного резервування. У роботах [4, 5] виконано аналіз технічних засобів та рішень з точки зору забезпечення атрибутів гарантоздатності КІСЗП «Благовіст». У роботі [6] наводяться додаткові аспекти вирішення проблем забезпечення гарантоздатності в системах критичного призначення.

У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належить: у роботі [7] запропонована ідея реалізації апаратно-керованого відновлення, блоку контролю, часткового блокування та маскування відмов на базі одного кристалу ПЛІС, що дозволяє реалізувати апаратну надлишковість і надає можливість ефективного використання відмовостійких квазімісткових структур. У роботі [8] здійснено аналіз резервування комбінаційних схем у вигляді цифрових блоків за топологією мажоритарного резервування з відновленням. У роботі [9] запропонована реалізація

резервованої двоканальної системи з реконфігурацією та відновленням, яка далі згадується як квазімісткова, за допомогою мультиплексорів. У роботах [10, 11] виконано імітаційне моделювання квазімісткової системи. У роботах [12-14] запропоновані варіанти апаратної реалізації інноваційних гарантоздатних систем автоматичної переїзної сигналізації для залізничних переїздів, відпрацьовано відмовостійкий алгоритм роботи системи, розроблена імітаційна модель системи та з використанням методу кінцевих автоматів описана у вигляді діаграм станів, відпрацьовано алгоритм створення відмовостійких систем на базі пакета Matlab Simulink. У роботі [15] виконано аналіз логічної функції квазімісткової структури. У роботах [16, 17] запропоновано ділити метрики на дві групи, що мають виключно кількісні та якісні оцінки, проведено аналітичні розрахунки вагових коефіцієнтів метрик, запропоновано використання відносних значень різноманітних параметрів у відносних величинах, нормованих на їх граничні значення. У серії робіт [17-20, 27] було впроваджено нові технічні рішення та алгоритми, що застосовані при розробці гарантоздатних КІСЗП серії «Благовіст», запропоновано використання бездротової передачі даних у системі, алгоритм розрахунку швидкості потяга на базі двоканальних колійних датчиків підрахунку осей, проведено аналіз ряду натурних експериментів. У роботі [21] запропоновано інформаційний підхід щодо підвищення безпеки проїзду автотранспорту через залізничні переїзди. У роботах [22, 29] запропоновано алгоритм моделювання надійності та проведено статистичне моделювання засобами пакета RELIABmod. У роботах [23, 24] здійснено аналіз положень стратегій побудови гарантоздатних систем, а саме відмовобезпеки та відмовостійкості. У роботі [25] запропоновано використання імітаційного моделювання у доказі функціональної безпеки систем. У роботі [26] запропоновано новий підхід, пов'язаний з функцією DN-розподілу, що дозволяє отримати оцінку ймовірності тривалості безвідмовного функціонування об'єкта. У роботі [28] проведено розрахунки показників достовірності та ймовірності безвідмовної роботи різних надлишкових структур комп'ютерних систем. У роботах [29, 30] виконано аналітичний розрахунок надійності квазімісткової структури. У роботі [31] запропоновані приклади елементів гравітаційної автоматики з високим рівнем

гарантування відключення при відмові та теоретичні основи їх використання, розглянуто приклад розробки живучої системи на основі квазімісткової структури. У роботі [32] проведено розрахунок функції середнього напрацювання на відмову відновлювального виробу у межах гіпотези про дифузійний закон розподілу (DN-розподіл).

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися на науково-технічних семінарах «Надійність, якість, сертифікація засобів обчислювальної техніки та автоматизації» ІПММС НАН України, на науково–практичних конференціях з міжнародною участю «Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС» (м. Київ, 2010 р.; м. Київ, 2013 р.; м. Київ, 2016 р.; м. Чернігів 2017 р.), IX International conference "Strategy of Quality in Indastry and Education" (Varna, Bulgary, 2013 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні питання розвитку технічних наук в умовах глобальної нестабільності» (м. Київ, 2013 р.), III Міжнародній конференції «Проблеми зняття з експлуатації об’єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища» INUDECO (м. Славутич, 2018 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 32 наукові роботи, у тому числі 26 статей у наукових журналах, які включені до різних міжнародних наукометричних баз даних, із них 20 статей опубліковано в наукових журналах, які входять також до переліку ДАК України як фахові, з них 4 одноосібні, та 6 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 123 найменувань та п’яти додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 235 сторінок, із яких 168 сторінок основного тексту та 54 сторінки додатків, 36 рисунків, 22 таблиці, що дорівнює 4,75 облікових аркуша.

РОЗДІЛ 1
РОЗРОБКА АТРИБУТИВНОЇ МОДЕЛІ ГАРАНТОЗДАТНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

1.1 Онтологія гарантоздатності КС

Аналізуючи різні аспекти розвитку сучасного суспільства, можливо відзначити, що саме на ІТ покладається дуже відповідальна роль, у якій вони стають основним та незамінним інструментом повсякденного життя. Виходячи з цього, можна сформулювати один фундаментальний принцип: чим більше ІТ приносять вигоди, тим більша ймовірність заподіяння ними шкоди у разі невиконання або невірного виконання їх функцій. Тому сучасне суспільство стає як би заручником якості послуг, що надаються ІТ. Важливою складовою такої залежності є рівень надійності і безпеки сервісів і систем, що базуються на ІТ. Це обумовлено тим, що недостатній рівень надійності і безпеки КС як засобів, що реалізують ІТ, призводить до матеріальних втрат і зниження конкурентоспроможності виробництв, продукції та бізнес–додатків. Більш серйозні наслідки проявляються у КС критичного призначення: це техногенні та екологічні катастрофи з людськими жертвами. Під системами критичного призначення розуміються матеріальні і віртуальні життєво важливі системи, які застосовуються у критичних інфраструктурах та технологіях, що можуть бути означені аналогічно до [33], знищення або виведення з ладу яких може вплинути на безпеку, включаючи національну, економічну безпеку, громадське здоров'я, громадський порядок або на будь–які їх комбінації.

У класичній теорії надійності існує термін надійність, що вживається виключно для якісного опису властивості об'єкта (висока надійність, низька надійність, задовільна надійність і т.п.). Надійність (Dependability) - властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання і транспортування. Інакше кажучи, надійність об'єкта полягає у відсутності непередбачених неприпустимих

змін його якості у процесі експлуатації і зберігання. У той же час, надійність трактується як комплексна властивість, що в залежності від призначення об'єкта та умов його експлуатації може включати в себе властивості безвідмовності, готовності, довговічності, ремонтопридатності і зберігання з відповідними кількісними характеристиками.

У 1986 р. з'явилася стаття [34], в якій англомовний термін «dependability», що має мале смислове навантаження, був наповнений дещо іншим змістом і названий стосовно КС гарантоздатністю. Відзначено, що базовою платформою, яка забезпечує гарантоздатність КС, є відмовостійкість, а атрибутами - безвідмовність, готовність, живучість, обслуговуваність, достовірність, цілісність, конфіденційність і функціональна безпека. Тому гарантоздатна КС (ГКС) - це відмовостійка, високонадійна, безпечна і живуча система з гарантовано достовірними обчисленнями.

Складність і масштабність вирішення проблеми забезпечення гарантоздатності КС ставить принципово нові завдання по організації істотно більш ефективних відмовостійких архітектурних рішень, реалізації нових підходів щодо забезпечення високої надійності, живучості та безпеки. Зі збільшенням складності розроблюваних систем у напрямі інжинірингу КС ставляться завдання з розробки комплексних методів автоматизації проектування (CALS-технології), нових методів і засобів прогнозування, діагностики та самоконтролю програмних і апаратних засобів, статистичного та імітаційного моделювання. Питання відмовостійкості, безпеки та живучості стали основоположними у створенні ГКС, вони залишаються на сьогоднішній день дуже актуальними та, в той же час, далекими від свого остаточного вирішення. Тільки комплексний підхід до вирішення даної проблеми на всіх етапах життєвого циклу КС (від формування концепції до утилізації) дозволить створювати системи з заданим рівнем гарантоздатності. Зрозуміло, що реалізація вимог із гарантоздатності призводить до загального подорожчання КС, включаючи і її розробку, тому завдання оптимізації прогнозованого рівня гарантоздатності і вартості КС є також досить актуальним і має велике соціальне і економічне значення.

Теорія ГКС досі розвинена недостатньо, що представляє собою важливу наукову проблему системного характеру і вимагає комплексних наукових і прикладних досліджень та відповідає пріоритетному напряму розвитку вітчизняної науки і техніки. Засновниками даного напряму досліджень введені нові поняття «гарантоздатні обчислення», «безпечна відмовостійкість», «багатоверсійність проектування», узагальнено підсумки розвитку гарантоздатних обчислень, визначена досить повна і збалансована система понять і таксонометричних схем, досліджено еволюцю парадигм в області ГКС. Наприклад, ще в 1959 році була створена Міжнародна федерація з обробки інформації (International Federation for Information Processing (IFIP)) - міжнародна організація, що сприяє розвитку теорії та застосуванню засобів обробки даних. Створення при IFIP в 1970 р. Технічного комітету з відмовостійких обчислень і робочої групи (WG 10.4) «Гарантоздатні обчислення і відмовостійкість» прискорило розробку та визнання системи визначень і термінів, яку виклав J.-C. Laprie у своїй книзі «Гарантоздатність. Основні визначення і термінологія» [35], виданої в 1992 році англійською, французькою, німецькою, італійською та японською мовами. У роботах найбільш відомих зарубіжних авторів Avizienis A., Laprie J.-C., Randell B., Landwehr C., Dobson I.E та ін. [34-39] наводяться узагальнені результати досліджень в області ГКС, які відносяться до фундаментальних основ гарантоздатності, включаючи питання N-версійного програмування при розробці гарантоздатних систем [40].

Розвиток теорії гарантоздатності ускладнюється комерційними таємницями та специфікою застосувань розробок у закритих тематиках військових установ. Тому, без аналогічних вітчизняних наукових і прикладних досліджень принципово неможливі створення і розробка ГКС високого рівня для критичних технологій та інфраструктур у нашій країні.

У міжнародній сфері область аналізу, оцінювання та розробки ГКС регламентується стандартом Міжнародної електротехнічної комісії [41] й передбачає перераховані в табл. 1.1 підходи до аналізу таких систем. Аналогічний документ [42] існує також у Російській Федерації.

Таблиця 1.1 – Деякі методи аналізу надійності відповідно IEC-60300-3-1

Назва виду аналізу	Стандарт
Аналіз дерев подій Event Trees Analysis (ETA)	IEC-62502 (2010)
Аналіз видів і наслідків відмов Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)	IEC-60812 (1985), MIL-STD-1629a (1980), ANSI/IEEE -STD-352 (1987)
Аналіз видів, наслідків і критичності відмов Failure Mode, Effect, and Criticality Analysis (FMECA)	IEC-60812 (1985); MIL-STD-1629a (1980); BS-5760 -5 (1991)
Аналіз дерев відмов Fault Trees Analysis (FTA)	IEC-61025 (2006), ANSI/IEEE-STD- 352 (1987), SAE-ARP-4761 (1996)
Аналіз функціональних відмов Functional Failure Analysis (FFA)	SAE -ARP-4761 (1996)
Аналіз експлуатаційної безпеки HAZard and Operability studies (HAZOP)	IEC-61882 (2001)
Марківський аналіз Markov analysis	IEC-61165 (2006), ANSI/IEEE-STD-352 (1987)
Аналіз мереж Петрі Petri Net analysis (PN)	ISO/IEC-15909- 1 (2004)
Попередній аналіз ризиків Preliminary Hazard Analysis (PHA)	MIL-STD-882c (1993), MIL-STD- 882d (2000)
Аналіз блок-схем надійності Reliability Block Diagrams analysis (RBD)	IEC-61078 (2006), ANSI/IEEE-STD- 352 (1987)
Аналіз таблиць істиності Truth table analysis	ANSI/IEEE-STD -352 (1987)

В Україні початком робіт в області теорії гарантоздатних систем для критичного призначення слід вважати 1989 р., коли була опублікована перша стаття з цієї тематики [43]. В даний час лідером цього напряму є д.т.н., професор В.С. Харченко (V.S. Kharchenko) з Національного авіаційно-космічного університету «ХАІ», який очолює наукову школу і активно розвиває теорію і практику ГКС у всіх аспектах її застосування. У циклі статей [44-47] описані фундаментальні питання створення ГКС.

Найбільш вагомі практичні результати, що отримані цієї науковою школою, відносяться до галузі атомної енергетики [48], авіації і систем спеціального призначення, детально описано процеси створення багатоверсійних [49-52] та web-систем [53-56]. Стосовно аналізу і опису процесів створення ГКС активно застосовуються методи формалізованої оцінки, основані на аналізуванні ризиків - FME (C)A, побудові дерев відмов і подій – FTA та аналізі аварійних ситуацій - HAZOP [24]. Значна частина досліджень склала основу документа [57], який застосовується для внутрішнього користування та підрядних організацій Національного космічного агентства України. Цей документ визначає методи оцінювання рівня гарантоздатності розроблюваної системи та відзначає декілька способів такого оцінювання, а саме, пропонується обчислювати ймовірність надання послуги, що може бути обчислена як добуток імовірностей відсутності (парирування) дефектів функціонування, розробки та взаємодії. Для чого пропонується детально аналізувати множину станів і переходів між ними, використовуючи апарат теорії марківських або напівмарківських процесів. Серед можливих методів оцінювання рівня гарантоздатності КС також вказана метрична оцінка рівня виконання атрибутів ГКС.

У роботі [58], що стосується області гарантоздатності КС, розглядається метод розрахунку окремих показників гарантоздатності комп’ютерних мереж з урахуванням властивості фрактальної надлишковості.

Серед дослідників у галузі гарантоздатності, відмовостійкості, надійності, живучості та безпеки також необхідно відзначити великий внесок вітчизняних вчених: д.т.н., професорів В.О. Романкевича і Ю.Г. Савченка (НТУ України «КПІ ім.

Ігоря Сікорського»), д.т.н., професора О.В. Дрозда (ОНПУ України), д.т.н., професора В.О. Романова (ІК ім. Академіка В.М. Глушкова НАН України), д.т.н., професора О.Г. Додонова (ІПРІ НАН України) та д.т.н., професора О.Д. Азарова (ВНТУ України).

У ІПММС НАН України роботи в області гарантоздатності були розпочаті в 1990 р. дослідженнями в рамках фундаментальних і прикладних наукових тем із шифрами «Відмовостійкість», «Надійність», «Гарантоздатність», «Ефективність», «Живучість» та «Безпека», які знайшли своє відображення в численних публікаціях д.т.н. Г.С Теслера, д.т.н. О.В. Федухіна, д.т.н. В.П. Стрельнікова у вигляді наукових звітів, монографій, статей, тез доповідей і навчальних посібників [59-64].

Теорія гарантоздатних систем не є усталеною класичною наукою, а постійно розвивається з урахуванням сучасних реалій і досягнень в області нової елементної бази та технологій виробництва компонентів КС, автоматизації проектування, нових архітектурних рішень і мережевих технологій, програмного забезпечення, методів технічної діагностики, прогнозування несправностей, моделювання, нового математичного апарата теорії надійності та ін.

1.2 Гарантоздатність КС

Як зазначено вище, вперше поняття «Гарантоздатні системи» було введено американським ученим литовського походження А. Авіженісом (A. Avizienis) [34], де була висловлено ідею об'єднання ряду показників надійності з деякими додатками в один комплексний показник, названий *гарантоздатністю.*

Визначення 1.1. Гарантоздатність визначається, як комплексна властивість КС уникати відмов та обслуговування, більш частих і більш серйозних, ніж встановлено у специфікації.

Тобто, на першому етапі гарантоздатність цілком зводилася до властивостей надійності (безвідмовності, готовності, обслуговуваності і відмовостійкості КС).

Пізніше поняття гарантоздатності було розширено атрибутами безпеки, живучості і достовірності [35]. При цьому атрибут розуміється як необхідна, істотна властивість об'єкта. А для оцінювання рівня гарантоздатності почали активно застосовуватися методи метричної оцінки [65].

За аналогією з атрибутивною моделлю поняття «матерія» [66] в області філософії введемо визначення атрибутивної моделі поняття «гарантоздатність КС» як методологічну основу побудови і розвитку сучасних КС. Відповідно до відомих [36, 45] таксономій гарантоздатності, на сьогоднішній день АМГКС повинна враховувати такі атрибути (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Перелік та визначення складових частин АМГКС

№ п/п	Найменування атрибута	Визначення атрибута
1	Безвідмовність	Властивість системи безупинно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або напрацювання
2	Готовність	Здатність системи виконувати необхідні функції при певних умовах експлуатації і технічного обслуговування в заданий момент або фіксований інтервал часу, за умов забезпечення необхідними зовнішніми ресурсами
3	Обслуговуваність	Здатність системи підлягати технічному обслуговуванню, модифікації і ремонту
4	Живучість	Властивість системи зберігати або відновлювати здатність виконувати основні функції в певному обсязі і протягом заданого напрацювання при зміні умов експлуатації, структури системи і (або) алгоритмів

Продовження таблиці 1.2

5	Достовірність	Ймовірність того, що значення параметра, який обчислюється, відображуваного інформацією або керуючим впливом, виробленим КС, відрізняється від істинного значення цього параметра в межах необхідної точності
6	Функціональна безпека	Здатність системи при наявності відмови не завдавати небезпечних (катастрофічних) впливів на людину (користувача) або навколишнє середовище її проживання
7	Конфіденційність	Властивість системи забезпечити захист від несанкціонованого використання інформації або технічного засобу, від підміни інформації або технічного засобу, від пошкодження інформації або технічного засобу
8	Цілісність	Властивість системи бути незмінною при функціонуванні в умовах випадкових або навмисних спотворень, або руйнівних впливів

Визначення 1.2. Атрибутивна модель гарантоздатності КС (АМГКС) **(**Attributive model dependability of computer systems, AMDCS) – модель гарантоздатності КС, яка повністю описує комплексну властивість КС за допомогою атрибутів і метрик.

Поняття «атрибут» охоплює безліч дуже різних за своєю природою ознак, рис, властивостей, які є у будь-якого матеріального об'єкта КС (наприклад, безвідмовність). При цьому, в кожному окремому матеріальному об'єкті – КС атрибути проявляються в особливій, властивій саме для нього формі. Атрибути можуть бути однозначними, що мають одну вимірювану величину (метрику) (наприклад, достовірність), і багатозначними, мають кілька метрик (наприклад, безвідмовність, готовність та ін.).

Для однорідності понять аналогічно визначенню стандарту ISO/IEC 9126 для метрик якості ПЗ (software quality metric) метрики гарантоздатності КС можливо означити таким чином.

Визначення 1.3. Метрика гарантоздатної КС (далі за текстом метрика) - міра, що дозволяє отримати чисельне значення деякої властивості гарантоздатної КС.

Розглянемо кожен атрибут гарантоздатності окремо, в тому порядку, який позначений в табл. 1.2, та виділимо, означимо й прокоментуємо його метрики.

1.3 Атрибути гарантоздатних КС

1.3.1 Атрибут безвідмовність

Класичні метрики безвідмовності систем [67], такі як ймовірність безвідмовної роботи $R(t)$ – ймовірність того, що в межах заданого напрацювання відмова об'єкта не виникає, середній наробіток до відмови (на відмову) T_{cp} – математичне очікування напрацювання об'єкта до першої відмови (на відмову), параметр потоку відмов $\omega(t)$ – відношення математичного очікування числа відмов відновлюваного об'єкта за досить мале напрацювання на відмову до значення цього напрацювання. Ці параметри не в повному обсязі характеризують безвідмовність системи, адже не враховують основну властивість гарантоздатних систем – їх відмовостійкість. Тому пропонується набір спеціальних метрик безвідмовності, що враховують властивість відмовостійкості системи, закладену при проектуванні (табл. 1.3).

Ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкої системи обчислюється за формулою

$$ {}^{f}_{c}R^{q}_{s} = c^{s}(1 - {}^{f}F^{q}_{s}), \tag{1.1} $$

де ${}^{f}F_{s}^{q}$ – функція ймовірності відмови з урахуванням параметрів f, q та s; s – кількість резервів, спочатку доступних для підключення, q – кількість модулів, що забезпечують задану продуктивність системи (характеристика актуальна для систем продуктивність яких залежить від кількості одночасно працюючих ресурсів), c – ступінь компенсації наслідків відмови (умовна ймовірність того, що при виникненні відмови у працюючій системі остання здатна відновити інформацію і продовжити її обробку без довготривалої втрати даних), f – здатність модуля допускати f одиничних відмов до того, як він стане непрацездатним.

Таблиця 1.3 – Перелік метрик атрибута безвідмовність

№ п/р	Найменування метрики	Примітки
1	Ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкої системи ${}_{c}^{f}R_{s}^{q}$	1. Якщо будь-який із параметрів базової моделі ${}_{c}^{f}R_{s}^{q}$ опускається, то за замовчанням передбачається, що $q=1$, $c=1$, $f=0$, $s=0$. Параметри s, c та f являються параметрами, збільшення яких призводить до збільшення загальної безвідмовності системи. 2. Якщо модуль системи є надлишковим або спроектований як f – безвідмовний автомат, то в межах f відмов ($f=1,2,3\ldots$) $c=1$
2	Поріг порівняння інформації в системі M_c:	
3	Число працездатних конфігурацій системи U_c	
4	Число ненадлишкових каналів системи N_c	
5	Ймовірність безвідмовної роботи ненадлишкового каналу системи $R_к(t)$	
6	Коефіцієнт відмовостійкості K_{BC}	

Приймаючи гіпотезу про DN-розподіл наробітку до відмови елементів, модулів і системи в цілому, ймовірність відмови будемо обчислювати таким чином (1.2):

$$ {}^{f}F_{s}^{q} = DN(x; v, f, q, s), \tag{1.2} $$

де v – коефіцієнт варіації наробітку до відмови, x – відносне напрацювання ($x = \frac{t}{T_1}$), t – час експлуатації (напрацювання), T_1 – середній наробіток до відмови.

Функція ймовірності відмови для DN-розподілу має такий вид:

$$DN(x;v) = \Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) + \exp\left(2v^{-2}\right)\Phi\left(-\frac{x+1}{v\sqrt{x}}\right), \tag{1.3}$$

де $\Phi(*)$ – функція нормованого нормального розподілу. Поріг порівняння інформації в системі обчислюється за формулою

$$M_c = \prod_{i=1}^{n} M_{ci}\ , \tag{1.4}$$

де M_{ci} – поріг порівняння i-го послідовно включеного порівняльного пристрою.

Число працездатних конфігурацій системи U_c обчислюється за формулою

$$U_c = \prod_{i=1}^{n} U_{ci}\ , \tag{1.5}$$

де U_{ci} – число працездатних конфігурацій i-ї підсистеми.

Число ненадлишкових каналів системи N_c – характеристика обсягу апаратних витрат, необхідних для досягнення даного рівня безвідмовності системи.

Ймовірність безвідмовної роботи ненадлишкового каналу системи $R_{\text{е}}(t)$ – характеристика рівня надійності елементів і складових частин ненадлишкового каналу системи.

Коефіцієнт відмовостійкості K_{BC} – відношення середніх наробітків на відмову відмовостійкої і нерезервованої систем обчислюється за формулою

$$K_{BC} = \frac{T_{BC}}{T_{HP}}, \tag{1.6}$$

де T_{HP} – середній наробіток на відмову нерезервованої системи, T_{BC} – середній наробіток на відмову відмовостійкої системи.

1.3.2 Атрибут готовність

Готовність є дуже важливим атрибутом гарантоздатності [67, 68], особливо для систем із безперервним циклом функціонування і систем критичного використання. Пропонується набір спеціальних метрик готовності, які враховують властивість системи. Це коефіцієнт готовності $K_г$ і коефіцієнт оперативної готовності $K_{ог}$

Коефіцієнт готовності $K_г$ - ймовірність того, що об'єкт виявиться у працездатному стані в довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається, обчислюється за формулою

$$K_г = \frac{T_{ср}}{\left(T_{ср} + T_в\right)}, \tag{1.7}$$

де $T_{ср}$ – середній наробіток на відмову (час роботи без збоїв) системи, $T_в$ – середній час відновлення системи.

Коефіцієнт оперативної готовності $K_{ог}$ – ймовірність того, що об'єкт виявиться у працездатному стані в довільний момент часу обчислюється за формулою

$$K_{ог} = K_{г} \cdot R(t_{\text{рб}}), \tag{1.8}$$

де $R(t_{\text{рб}})$ – ймовірність безвідмовної роботи системи на момент часу роботи $t_{\text{рб}}$.

1.3.3 Атрибут обслуговуваність

Обслуговуваність є важливим атрибутом для систем із безперервним циклом функціонування і систем критичного використання [69]. Пропонується набір спеціальних метрик обслуговуваності, які враховують властивість системи. Це тривалість технічного обслуговування, $T_{то}$, середній час відновлення $T_{в}$, коефіцієнт технічного використання $K_{тв}$.

Тривалість технічного обслуговування $T_{то}$ – середній час виконання робіт з обслуговування системи, передбачений технічною документацією.

Середній час відновлення $T_{в}$ – проміжок часу, витрачений на відновлення працездатного стану системи або його складової частини після відмови.

Коефіцієнт технічного використання $K_{тв}$ - відношення математичного очікування інтервалів часу перебування системи у працездатному стані за деякий період експлуатації до суми математичних очікувань інтервалів часу простоїв, техобслуговування і ремонтів.

$$K_{тв}(t) = K_{г}(t)\,\frac{t_{д}}{t_{н}}, \tag{1.9}$$

де $K_{г}(t)$– коефіцієнт готовності системи, $t_{н}$ – річний номінальний фонд часу, протягом якого об'єкт може використовуватися за призначенням, $t_{д}$ – річний дійсний

фонд часу роботи об'єкта, який дорівнює номінальному фонду за вирахуванням простоїв, пов'язаних із проведенням планового технічного обслуговування (періодичних профілактик) і ремонту.

1.3.4 Атрибут живучість

Живучість є специфічним атрибутом гарантоздатності систем і раніше застосовувався виключно для систем військового призначення. Живучість – це властивість, що закладається в систему під час проектування і яка дозволяє зберігати повну або обмежену працездатність системи внаслідок зміни умов експлуатації, структури і алгоритмів при наявності її складових частин, що відмовили, та не допускати переходу їх відмов у критичні [70, 71]. Пропонується набір спеціальних метрик живучості, які враховують властивість відмовостійкості системи, це коефіцієнт живучості $G(q^i)$, коефіцієнт деградації $D(q^i)$, виживаність системи $R(n)$.

Коефіцієнт живучості $G(q^i)$ – відношення числа станів, що відповідають працездатній системі, до всієї сукупності станів.

$$G(q^i) = \frac{M}{C_l^i}, \tag{1.10}$$

де M – кількість працездатних станів системи для узагальненої відмови *i*-тої кратності, C_l^i – загальна кількість станів системи, i – кратність узагальненої відмови, l – кількість функціональних одиниць живучості системи.

Коефіцієнт деградації $D(q^i)$ – відношення числа станів, які відповідають непрацюючій системі, до загальної кількості станів системи.

$$D(q^i) = \frac{N}{C_l^i}, \tag{1.11}$$

де N – число станів, відповідних непрацюючій системі, C_l^i – загальна кількість станів системи, i – кратність узагальненої відмови, l – кількість функціональних одиниць живучості системи.

Виживаність системи $R(n)$ – ймовірність збереження працездатності при *n*-кратному несприятливому впливі (НВ).

$$R(n) = 1 - Q(n) = P(F = 1 / A_n), \tag{1.12}$$

де F - функція працездатності системи, яка приймає значення «1», якщо система працездатна, і «0», якщо система непрацездатна; A_n – подія, яка відбувається при *n*-кратному прояві НВ.

1.3.5 Атрибут достовірність

При розгляді функціонування КС як показника достовірності будемо використовувати ймовірність отримання достовірного результату в ході проведення обчислень (обробки даних) [23].

Достовірність функціонування КС за час t пропонується обчислювати за допомогою феноменологічної моделі:

$$D = [d_{\grave{i}} \cdot {}_c^f R_s^q] \cdot k, \tag{1.13}$$

де $d_{\grave{i}}$ – достовірність обчислень модуля – умовна ймовірність того, що значення визначального параметра π , який обчислюється модулем, відрізняється

від істинного значення цього параметра в межах необхідної точності, π – визначальний параметр – критерій правильного функціонування модуля, ${}_c^f R_s^q$ – ймовірність безвідмовної роботи системи за час t, k – коефіцієнт, що враховує кратність порівняння інформації між каналами в процесі функціонування системи або поріг порівняння послідовно включеного порівняльного пристрою.

1.3.6 Атрибут функціональна безпека

Функціональна безпека є дуже важливим атрибутом для систем критичного використання, пов'язаних із безпекою людей і навколишнього середовища проживання людини (системи енергетики, хімічної промисловості, транспорту та ін.. Для таких систем прийнято нормувати допустимі рівні всіх або деяких метрик [72, 73]. Пропонується набір спеціальних метрик функціональної безпеки, які враховують відповідну властивість системи. Це ймовірність безпечної роботи $R_{БР}(t)$, ймовірність небезпечної відмови $Q_{НВ}(t)$, середній наробіток на небезпечну відмову, коефіцієнт безпеки $K_Б$.

Ймовірність безпечної роботи $R_{БР}(t)$ – ймовірність того, що в межах заданого напрацювання небезпечна відмова системи не настає.

$$R_{БР}(t) = 1 - F_{НВ}(t), \tag{1.14}$$

де $F_{НВ}(t)$ – функція розподілу наробітку до небезпечної відмови.

Ймовірність небезпечної відмови $Q_{НВ}(t)$ – ймовірність того, що в межах заданого напрацювання небезпечна відмова настає хоча б один раз.

$$Q_{НВ}(t) = F_{НВ}(t) = 1 - R_{БВ}(t)\,. \tag{1.15}$$

Середній наробіток на небезпечну відмову $T_{НВср}$ – відношення сумарного напрацювання відновлюваної системи до математичного очікування числа небезпечних відмов протягом цього напрацювання.

Коефіцієнт безпеки $K_Б$ – ймовірність того, що система виявиться у *працездатному або захисному* стані в довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається.

$$K_Б = \frac{T_{НВср}}{(T_{НВср} + T_{НВв})}, \tag{1.16}$$

де $T_{НВв}$ – середній час відновлення після небезпечної відмови.

1.3.7 Атрибут конфіденційність

Конфіденційність є важливим атрибутом для відкритих і розподілених систем, в основі яких лежить мережева ідеологія, а також для систем критичного призначення. Нами цей атрибут декларується як властивість системи забезпечувати захист від несанкціонованого використання інформації або технічного засобу, від підміни інформації або технічного засобу, від пошкодження інформації або технічного засобу [74].

Пропонується набір спеціальних метрик конфіденційності, які враховують відповідну властивість системи. Це ймовірність порушень $P_П$, рівень доступності $L_Д$, рівень секретності $L_С$.

Ймовірність порушень $P_П$ – ймовірність порушень конфіденційності технічних засобів і/або інформації. Рівень доступності $L_Д$ – характеристика здатності системи забезпечувати фізичний захист від можливості зміни заданих

параметрів технічних і/або інформаційних ресурсів у заданих точках за кінцевий час.

Рівень секретності L_C – характеристика здатності системи зберігати секретність технічних і/або інформаційних ресурсів.

Загальним для моделей забезпечення конфіденційності є те, що всі вони спрямовані на введення певних обов'язкових процедур аналізу конфіденційності програм, засобів, ресурсів і користувачів, які взаємодіють з ГКС.

Кожній метриці конфіденційності відповідає набір критеріїв, за якими відбувається оцінка конфіденційності ГКС (Додаток В, п. В.3). Набір критеріїв можна змінювати в залежності від призначення і специфіки функціонування конкретної ГКС. Рівень виконання критерію оцінки визначається величиною U_i ($i=1,\ldots n$), яка знаходиться в діапазоні значень 0÷1.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n} U_i}{n}, \tag{1.17}$$

де n – кількість критеріїв метрики М.

1.3.8 Атрибут цілісність

Цілісність є важливим атрибутом для відкритих і розподілених систем, в основі яких лежить мережева ідеологія. Цей атрибут можливо трактувати як властивість системи бути незмінною при функціонуванні в умовах випадкових або навмисних спотворень, або руйнівних впливів [75].

Пропонується набір спеціальних метрик функціональної безпеки, які враховують відповідну властивість системи, це рівень цілісності обчислювальних

ресурсів $L_{ОР}$, рівень цілісності програмних ресурсів $L_{ПР}$, рівень цілісності інформації $L_{ЦІ}$.

Рівень цілісності обчислювальних ресурсів $L_{ОР}$ – характеристика здатності системи виключати непередбачені структурні зміни і надані послуги.

Рівень цілісності програмних ресурсів $L_{ПР}$ – характеристика здатності системи виключати непередбачені зміни програмних ресурсів.

Рівень цілісності інформації $L_{ЦІ}$ – характеристика здатності системи забезпечувати незмінність інформації в умовах випадкового і (або) навмисного спотворення (руйнування).

Загальним для моделей забезпечення цілісності є те, що всі вони спрямовані на введення певних обов'язкових процедур аналізу цілісності програм, засобів, ресурсів і користувачів які взаємодіють з ГКС.

Кожному показнику цілісності відповідає набір критеріїв, за якими відбувається оцінка цілісності ГКС (Додаток В, п. В.3). Набір критеріїв можна змінювати в залежності від призначення і специфіки функціонування конкретної ГКС. Рівень виконання критерію оцінки визначається величиною K_i (i=1,…n), яка знаходиться в діапазоні значень 0÷1.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i}{n}, \tag{1.18}$$

де n – кількість критеріїв метрики М.

1.4 Атрибутивна модель гарантоздатності КС

Введене поняття «рівень гарантоздатності» системи є актуальним насамперед на

етапі її проектування, коли порівнюються між собою різні варіанти виконання системи. Однак досягнутий рівень гарантоздатності можна оцінювати і експериментальним шляхом на етапі підконтрольної експлуатації системи.

Визначення комплексу метрик атрибутів гарантоздатності описаних вище, дозволяє підійти до формалізації узагальненого критерію рівня досягнутої гарантоздатності розроблюваної системи.

Для цього необхідно кожен атрибут моделі розглядати на комплекс метрик, які можуть бути вимірювані розрахунковими, експериментальними або експертними методами.

На основі кількісних оцінок метрик необхідно обчислювати кількісні оцінки атрибутів і далі через них обчислювати кількісні оцінки досягнутого рівня гарантоздатності аналізованої системи для різних варіантів її виконання.

Як аналітичний вираз АМГКС, призначений для обчислення рівня гарантоздатності системи, пропонується використовувати функціонал $G_{(AM)}$, складовими якого є нормовані значення кількісних оцінок рівнів реалізації атрибутів і метрик з відповідними ваговими коефіцієнтами. Величини вагових коефіцієнтів залежать від особливостей застосування кожної конкретної системи і можуть бути обчислені аналітично або оцінені експертним методом.

$$G_{(AM)} = \sum_{i=1}^{n} B_i A_i \,, \tag{1.19}$$

де n – кількість атрибутів АМГКС, B_i – коефіцієнт впливу i -го атрибута, A_i – кількісна оцінка рівня виконання i -го атрибута у відносних величинах.

$$A_i = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} \,, \,, \tag{1.20}$$

де m_i – кількість метрик i -го атрибута, β_{ij} - вага j -ї метрики i -го атрибута,

M_{ij} – кількісна оцінка рівня виконання j-ї метрики i-го атрибута у відносних величинах.

Примітка 1.1. Кількісні оцінки рівня виконання метрики представляють собою відносні величини, нормовані на значення, задані у специфікації, або граничні значення.

Підставивши (1.19) в (1.20), отримаємо математичну модель комплексної оцінки рівня гарантоздатності КС:

$$G_{(AM)} = \sum_{i=1}^{n} B_i \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} \ . \tag{1.21}$$

1.5 Кількісна оцінка вагових коефіцієнтів атрибутів і метрик ГКС

1.5.1 Експертний метод

Розглянемо можливий підхід до оцінювання вагових коефіцієнтів атрибутів і метрик досліджуваних систем експертним методом [11].

Твердження 1.1. При визначенні ваг метрик вважається, що більш високе сумарне число наданих експертами оціночних балів пропорційно збільшує частку даної метрики щодо сумарного числа балів, отриманих від усіх експертів серед аналогічних часток інших метрик.

Нехай число якісних метрик деякого атрибута гарантоздатності (наприклад, цілісності) дорівнює m, а число експертів, залучених для їх оцінювання, дорівнює n. Кожному експерту видається деякий трафарет для голосування, що містить m наступних один за одним комірок для заповнення оціночними балами (цілими числами), причому максимально можливий бал дорівнює m, а мінімальний – 1.

Кожній метриці присвоюється незмінний ідентифікаційний номер, при цьому i-а ($i = 1,\ldots m$) комірка призначена для балу метрики з аналогічним ідентифікаційним номером i.

Введемо такі позначення: a_{ij} – оцінка (в балах) i-ої метрики, що дана j-м експертом ($j=1,\ldots n$), b_i – експертна оцінка ваги i-ої метрики. Вага b_i розраховується за формулою

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}, \text{ де } i=1,\ldots m. \tag{1.22}$$

Приклад розрахунку експертного оцінювання приведений у (Додатку Б, п. Б.1)

1.5.2 Аналітичний метод

Уявімо, що є система з кінцевим числом атрибутів і нехай деякий її атрибут описується трьома метриками з оцінками M_1, M_2, M_3. Передбачається, що аналогічно пропозицією в [76] система може бути представлена деяким показником у вигляді лінійного функціонала

$$\beta_1 M_1 + \beta_2 M_2 + \beta_3 M_3, \tag{1.23}$$

де $M_i (i = 1,2,3)$ – оцінки метрик із відповідними невідомими вагами β_i.

Визначення 1.4. Оцінки метрик M_i будемо рахувати показниками високого рівня, а оцінки критеріїв метрик (U_i, K_i та ін.) – показниками низького рівня.

У зв'язку з тим, що створення ГКС є дуже витратним проектом, то, беручи до уваги специфіку функціонування КС, немає сенсу реалізовувати кожен атрибут і кожну метрику з однаковим, максимально високим рівнем. Логічно припустити, що найбільш важливу метрику деякого атрибута слід реалізовувати з найбільшим

рівнем. Наступним припущенням є те, що найбільш важлива метрика, яка має найвищу реалізацію, повинна мати найвищу вагу. На цій основі розроблені два аналітичних методи оцінки ваг метрик в АМГКС.

Твердження 1.2. Ваги метрик β_i є деякими функціями від M_1, M_2, M_3.

Твердження 1.3. Метрики $M_i (i = 1,2,3)$ представляються своїми нормованими значеннями щодо значень, встановлених в специфікації або у відповідних нормативних документах. Очевидно, що вираз

$$\beta_i M_i / (\beta_1 M_1 + \beta_2 M_2 + \beta_3 M_3) \ (i=1,2,3) \tag{1.24}$$

можливо розглядати як частку (вагу) доданку $\beta_i M_i$ в сумі $\beta_1 M_1 + \beta_2 M_2 + \beta_3 M_3$. Сформулюємо такі леми.

Лема 1.1. Ваги β_i є чисельним відображенням результату взаємодії процесів функціонування системи, що описуються метриками $M_i (i = 1,2,3)$.

Лема 1.2. Кожна метрика M_i підпадає під вплив інших метрик, а ступінь цього взаємовпливу залежить від кількісних оцінок, які представляють метрики.

Спираючись на Леми 1.1, 1.2, представимо два аналітичних методи оцінок ваг метрик.

Метод 1. Аналітична оцінка ваг метрик

Розглянемо як приклад відношення $M_1 / (M_2 + M_3)$. При зменшенні суми $M_2 + M_3$ (суми, що залишилися по відношенню до M_1) можливо апріорі передбачувати, що вплив величини M_1 на вклад у суму (1.23) буде збільшуватися, а при збільшенні суми $M_2 + M_3$ зменшуватися. Аналогічне міркування може бути застосовано до співвідношень $M_2 / (M_1 + M_3)$ та $M_3 / (M_1 + M_2)$.

Такі інтуїтивні міркування грунтуються на Лемі 1.3.

Лема 1.3. Сума відносних вкладів $\beta_i M_i / \sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i$ величин $\beta_i M_i$ в їх суму $\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i$ дорівнює 1.

$$(\beta_1 M_1 + \beta_2 M_2 + \beta_3 M_3) / \sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i = 1. \tag{1.25}$$

Із прагматичних міркувань ліву частину рівності (25) можна прирівняти деякому виразу, також рівному 1. Згаданий вираз можливо отримати таким чином. Суму відношень $\frac{M_1}{M_2 + M_3}$, $\frac{M_2}{M_1 + M_3}$, $\frac{M_3}{M_1 + M_2}$ можна вважати сумарною чисельною характеристикою взаємовпливу метрик одна на одну:

$$\frac{M_1 /(M_2 + M_3)}{M_1 /(M_2 + M_3) + M_2 /(M_1 + M_3) + M_3 /(M_1 + M_2)} = \frac{M_1 /(M_2 + M_3)}{S_F},$$

де S_F – позначення знаменника лівої частині рівності, можна називати вагою впливу метрики M_1.

Аналогічно $[M_2 /(M_1 + M_3)] / S_F$ – це вага впливу метрики M_2, а $[M_3 /(M_1 + M_2)] / S_F$ – вага впливу метрики M_3. Безпосередньо видно, що сума ваг впливу цих трьох метрик дорівнює 1. Нижче ваги впливу представляються в іншому вигляді для їх подальшого використання.

Отже, після очевидних алгебраїчних перетворень, що призводять до відсутності в чисельнику і знаменниках виразів операцій ділення, отримуємо нові вирази згаданих ваг впливу метрик, позначені як $b_i (i = 1,2,3)$:

$$b_1 = \frac{M_1(M_1 + M_2)(M_1 + M_3)}{M_1(M_1 + M_2)(M_1 + M_3) + M_2(M_2 + M_1)(M_2 + M_3) + M_3(M_3 + M_1)(M_3 + M_2)} = \\ = \frac{M_1(M_1 + M_2)(M_1 + M_3)}{S_M}, \tag{1.26}$$

де S_M – позначення знаменника першого члена ланцюжка рівності (1.26).

$$b_2 = \frac{M_2(M_2 + M_1)(M_2 + M_3)}{S_M}, \tag{1.27}$$

$$b_3 = \frac{M_3(M_3 + M_1)(M_3 + M_2)}{S_M}. \tag{1.28}$$

Із формул (1.26-1.28) видно, що сума вагів впливу метрик $\sum_{i=1}^{3} b_i = 1$.

Теорема 1.1. Вклади будь-яких довільно обраних двох метрик $\beta_i M_i$ в суму $\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i$ дорівнюють відношенню ваг впливу цих метрик b_i з безлічі $M_i (i = 1,2,3)$, зокрема, має місце рівність виду $\frac{\beta_i M_i}{\sum_{I=1}^{3} \beta_i M_i} = b_i$.

Доведення: Виходячи із припущення, що співвідношення вкладів величин $\beta_i M_i$ в суму $\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i$ пропорційно співвідношенню ваг впливу відповідних метрик M_i, вважаємо, що з урахуванням формул (1.26-1.28) справедливі рівності:

$$\frac{\beta_2 M_2 / \sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i}{\beta_1 M_1 / \sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i} = \frac{b_2}{b_1} = \frac{M_2(M_2 + M_1)(M_2 + M_3)/S_M}{M_1(M_1 + M_2)(M_1 + M_3)/S_M}, \tag{1.29}$$

$$\frac{\beta_3 M_3 / \sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i}{\beta_1 M_1 / \sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i} = \frac{b_3}{b_1} = \frac{M_3(M_3 + M_1)(M_3 + M_2)/S_M}{M_1(M_1 + M_2)(M_1 + M_3)/S_M}, \tag{1.30}$$

$$\frac{\beta_3 M_3 / \sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i}{\beta_2 M_2 / \sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i} = \frac{b_3}{b_2} = \frac{M_3(M_3 + M_1)(M_3 + M_2)/S_M}{M_2(M_2 + M_1)(M_2 + M_3)/S_M}. \tag{1.31}$$

Після очевидних скорочень у чисельнику і знаменниках виразів у лівих і правих частинах ланцюжків рівності (1.29-1.31) отримуємо залежності між шуканими вагами $\beta_i (i=1,2,3)$ в такому вигляді:

$$\beta_2 = \frac{M_2 + M_3}{M_1 + M_3}\beta_1,\ \beta_3 = \frac{M_3 + M_2}{M_1 + M_2}\beta_1. \tag{1.32}$$

Залежність $\beta_3 = \frac{M_3 + M_1}{M_2 + M_1}\beta_2$ є очевидним наслідком залежностей з (1.32). При отриманні виразів для шуканих вагів $\beta_i(i=1,2,3)$ скористаємося припущенням, що виконується умова $\sum_{i-1}^{3}\beta_i=1$. З урахуванням цієї умови, а також виразів з (1.32), справедливий наступний ланцюжок рівностей:

$$\beta_1 + \frac{M_2 + M_3}{M_1 + M_3}\beta_1 + \frac{M_3 + M_2}{M_1 + M_2}\beta_1 =$$
$$= \beta_1 \frac{(M_1 + M_2)(M_1 + M_3) + (M_2 + M_1)(M_2 + M_3) + (M_3 + M_1)(M_3 + M_2)}{(M_1 + M_2)(M_1 + M_3)} = 1$$

звідки

$$\beta_1 = \frac{(M_1 + M_2)(M_1 + M_3)}{(M_1 + M_2)(M_1 + M_3) + (M_2 + M_1)(M_2 + M_3) + (M_3 + M_1)(M_3 + M_2)} = \\ = \frac{(M_1 + M_2)(M_1 + M_3)}{S_Z}, \tag{1.33}$$

де S_Z – позначення знаменника виразу з лівої частини ланцюжка (1.33).

З урахуванням залежностей, представлених у (1.32), і рівності (1.33) отримуємо формули для β_2 і β_3:

$$\beta_2 = \frac{(M_2 + M_1)(M_2 + M_3)}{S_Z};\ \beta_3 = \frac{(M_3 + M_1)(M_3 + M_2)}{S_Z}. \tag{1.34}$$

Неважко бачити, що $\sum_{i=1}^{3}\beta_i=1$, так як сума чисельників дробів, що представляють вираження для $\beta_i(i=1,2,3)$, дорівнює спільного знаменника цих дробів, тобто величині S_Z.

Таким чином, гіпотеза про пропорційності відносин вкладів будь-яких двох метрик у суму $\sum_{i=1}^{3}\beta_i M_i$ і відношень ваг впливу цих метрик правомірна.

Отже, тепер можливо довести, використовуючи отримані вище формули, що має місце особливий факт, з якого випливає згадана пропорційність.

З формули (1.33) випливає, що

$$\beta_1 M_1 = \frac{M_1(M_1+M_2)(M_1+M_3)}{S_Z}, \tag{1.35}$$

а використовуючи формули (32-33), отримуємо таку рівність:

$$\sum_{i-1}^{3} \beta_i M_i = \tag{1.36}$$
$$\frac{M_1(M_1+M_2)(M_1+M_3)}{S_Z} + \frac{M_2(M_2+M_1)(M_2+M_3)}{S_Z} + \frac{M_3(M_3+M_1)(M_3+M_2)}{S_Z}.$$

Тепер видно, що співставлення правих частин рівностей (1.35) і (1.36) дорівнює виразу, який представляє в (1.26) величину b_1. Отже, рівність $\frac{\beta_1 M_1}{\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i} = b_1$ справедлива. Так само показується, що мають місце рівності $\frac{\beta_2 M_2}{\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i} = b_2$ і $\frac{\beta_3 M_3}{\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i} = b_3$, де b_2 і b_3 – відповідно ваги впливу метрик M_2 і M_3, що виражаються формулами (1.27, 1.28). Отримання формул (1.32-1.33) для ваг β_i дає можливість представити цей функціонал (суму $\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i$) в явному вигляді, що залежить тільки від змінних - метрик M_i (i = 1,2,3).

Це уявлення має такий вигляд:

$$\beta_1 M_1 + \beta_2 M_2 + \beta_3 M_3 =$$
$$= \frac{M_1(M_1+M_2)(M_1+M_3) + M_2(M_2+M_1)(M_2+M_3) + M_3(M_3+M_1)(M_3+M_2)}{(M_1+M_2)(M_1+M_3) + (M_2+M_1)(M_2+M_3 + (M_3+M_1)(M_3+M_2)}. \tag{1.37}$$

Коректність викладеного підходу дозволить отримувати явні вирази для аналогів суми $\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i$ у випадках атрибутів із числом метрик, більшим трьох.

У викладеному методі всі три метрики є сприятливими.

Визначення 1.5. Сприятливою метрикою будемо називати метрику, збільшення чисельного (нормованого) значення якої сприяє підвищенню рівня гарантоздатності системи.

Прикладом такої метрики може бути, наприклад, імовірність безвідмовної роботи системи протягом деякого заданого проміжку часу.

Визначення 1.6. Несприятливою метрикою будемо називати таку метрику, збільшення чисельного (нормованого) значення якої призводить до зниження рівня гарантоздатності системи.

Як приклад такої метрики може послужити така метрика – середній час відновлення працездатності системи. У представленому вище підході кожна з трьох сприятливих метрик M_i (i=1,2,3) атрибута вносила відповідний позитивний внесок $\beta_i M_i (i = 1,2,3)$ в суму $\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i$.

Відслідкуємо, як змінилася б ця сума, якщо б деякі метрики атрибута виявилися несприятливими.

Нехай атрибут характеризується двома сприятливими метриками M_1, M_2 та однією несприятливою метрикою M_3. За формулами (1.33) і (1.34) визначаються величини $\beta_i (i=1,2,3)$, а отдже, і $\beta_i M_i (i = 1,2,3)$. Правомірно вважати, що тепер в спочатку запропонованому вигляді виразу $\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i$, доданки $\beta_1 M_1$ і $\beta_2 M_2$ будуть позитивними, а доданок $\beta_3 M_3$, що відповідає несприятливої метриці M_3, повинен змінити свій знак на протилежний $-\beta_3 M_3$. При цьому явний вид виразу $\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i$ буде таким:

$$\beta_1 M_1 + \beta_2 M_2 - \beta_3 M_3 . \qquad (1.38)$$

Приклад 1.1. Для прикладу розглянемо атрибут живучість, що описується трьома метриками, які мають розрахункові значення:

$M_1 = G(q^i) = 0{,}68$ – коефіцієнт живучості, $M_2 = D(q^i) = 0{,}2$ – коефіцієнт деградації, $M_3 = R(n) = 0{,}94$ – виживаність системи.

У такому випадку, відповідно до формул (1.33), (1.34), значення $\beta_1 = 0{,}333427$, $\beta_2 = 0{,}234634$, $\beta_3 = 0{,}431939$, умова $\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i = 1$ виконується.

Оціночне значення атрибута за виразом (1.37), з урахуванням сприятливості метрик, буде таким:

$\beta_1 M_1 - \beta_2 M_2 + \beta_3 M_3 =$(0,68*0,333427)-(0,2*0,234634)+(0,94*0,431939)= 0,585827.

Таким чином, отримане числове значення для атрибута у майбутньому можливо використовувати для оцінки загального рівня гарантоздатності досліджуваної системи.

Додаткові приклади розрахунків наведено у Додатку Б, п. Б.2.

Метод 2. Аналітична оцінка ваг метрик

Нехай дана система з кінцевим числом атрибутів і деякий її атрибут описується трьома метриками M_1, M_2, M_3 та числовими оцінками M_1, M_2, M_3. Передбачається, що система, аналогічно до пропозиції [15], представлена деяким показником у вигляді лінійного функціонала $\beta_1 M_1 + \beta_2 M_2 + \beta_3 M_3$, де $M_i (i = 1,2,3)$ – чисельні оцінки метрик з відповідними невідомими вагами β_i, які потрібно визначити.

Запишемо гіпотетичні рівності, що представляють сутність методу:

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \left(\frac{M_2}{M_2 + M_1} + \frac{M_2}{M_2 + M_3} \right) \Big/ \left(\frac{M_1}{M_1 + M_2} + \frac{M_1}{M_1 + M_3} \right), \tag{1.39}$$

$$\frac{\beta_3}{\beta_1} = \left(\frac{M_3}{M_3 + M_1} + \frac{M_3}{M_3 + M_2} \right) \Big/ \left(\frac{M_1}{M_1 + M_2} + \frac{M_1}{M_1 + M_3} \right), \tag{1.40}$$

$$\frac{\beta_3}{\beta_2} = \left(\frac{M_3}{M_3 + M_1} + \frac{M_3}{M_3 + M_2} \right) \Big/ \left(\frac{M_2}{M_2 + M_1} + \frac{M_2}{M_2 + M_3} \right). \tag{1.41}$$

Розглянемо рівність (1.39). У ньому β_2/β_1 – відношення ваг β_2 та β_1; $M_2/(M_2+M_1)$ - частка (вага) чисельного значення величини M_2 щодо суми M_2+M_1, $M_2/(M_2+M_3)$ – відносна вага M_2 у сумі M_2+M_3. Суму цих відношень можна умовно називати вагою метрики M_2. У повній аналогії з цим величину, що стоїть у правій частині круглої дужки в (1.40), можна називати вагою метрики M_1, а величину вираження в лівих дужках рівності (1.40) або (1.41) – вагою метрики M_3.

Про ранжирування величин метрик $M_i (i=1,2,3)$

Нехай є набір з трьох метрик з іменами X_1, X_2, X_3, яким можуть бути певним чином присвоєні чисельні значення. Після такого присвоєння згадані значення розташовуються так, що M_1 - це максимальне із присвоєних значень, M_2 – дещо менше, і, нарешті, M_3 – мінімальне з таких значень. Отже, величини $M_i (i=1,2,3)$ утворюють ланцюжок нерівностей

$$M_1 \geq M_2 \geq M_3, \tag{1.42}$$

яку можна назвати умовою ранжирування (УР). Мається на увазі, що не обов'язково значення M_1 присвоєно метриці X_1, а значення M_3 - метриці X_3, т.ч. умова ранжирування може відповідати в різних випадках будь який перестановці імен X_1, X_2, X_3. Зрозуміло, що при кожному присвоєнні іменам X_1, X_2, X_3 чисельних значень можливо фіксувати, який саме перестановці імен відповідають значення, підлеглі УР.

Припущення 1.1. Ланцюжок (1.42), у якому будуть фігурувати знаки тільки строгої нерівності, також є УР. Саме це буде використано далі.

Відсутність знаків рівності в ланцюжку (1.42) у деякій мірі може бути виправдане тільки бажанням уникнути зайвої громіздкості в подальшому викладі, а й тим фактом, що повна рівність (наприклад, =) практично замінима нерівністю при чисельних розрахунках із використанням досить великого числа десяткових знаків.

Прийняте припущення не торкнеться суті представленої тут моделі.

Проведемо перетворення виду гіпотетичних рівностей. Ці перетворення очевидним чином виходять за допомогою розподілу чисельників і знаменників дробів - доданків, що стоять у дужках рівностей (1.39), (1.40) і (1.41), на відповідні величини $M_i (i = 1,2,3)$. Отже, тепер рівності (1.39), (1.40) і (1.41) приймуть такий вигляд:

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \left(\frac{1}{1 + M_1/M_2} + \frac{1}{1 + M_3/M_2} \right) \Bigg/ \left(\frac{1}{1 + M_2/M_1} + \frac{1}{1 + M_3/M_1} \right), \tag{1.43}$$

$$\frac{\beta_3}{\beta_1} = \left(\frac{1}{1 + M_1/M_3} + \frac{1}{1 + M_2/M_3} \right) \Bigg/ \left(\frac{1}{1 + M_2/M_1} + \frac{1}{1 + M_3/M_1} \right), \tag{1.44}$$

$$\frac{\beta_3}{\beta_2} = \left(\frac{1}{1 + M_1/M_3} + \frac{1}{1 + M_2/M_3} \right) \Bigg/ \left(\frac{1}{1 + M_1/M_2} + \frac{1}{1 + M_3/M_2} \right). \tag{1.45}$$

Для доданків, що знаходяться в дужках рівностей (1.43), (1.44) і (1.45) введемо такі позначення:

$$\frac{1}{1 + M_1/M_2} = a, \tag{1.46}$$

$$\frac{1}{1 + M_1/M_3} = b, \tag{1.47}$$

$$\frac{1}{1 + M_2/M_3} = c. \tag{1.48}$$

Це рівносильно введенню в розгляд нових змінних a, b, c, що залежать від відповідних відносин метрик $M_i (i = 1,2,3)$. Тепер з трьох рівностей (1.46) - (1.48) неважко отримати вирази для відповідних відношень метрик $M_i (i = 1,2,3)$. Так із (1.46) випливає ланцюжок наслідків $a \frac{M_1}{M_2} + a = 1$, звідки

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{1-a}{a}, \quad \frac{1}{1+M_2/M_1} = 1-a. \tag{1.49}$$

Далі

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{a}{1-a} < 1, \text{ і як наслідок, } a < 0{,}5. \tag{1.50}$$

Тут використано положення $M_2 < M_1$ згідно з умовою ранжирування (1.42). З (1.47) маємо $\frac{bM_1}{M_3} + b = 1$, звідки $\frac{M_1}{M_3} = \frac{1-b}{b}$. В результаті отримуємо

$$\frac{1}{1+M_1/M_3} = b, \tag{1.51}$$

$$\frac{M_1}{M_3} = \frac{1-b}{b}, \tag{1.52}$$

і, як наслідок,

$$\frac{1}{1+M_3/M_1} = 1-b. \tag{1.53}$$

За аналогією, з (1.48) випливає $c\frac{M_2}{M_3} + c = 1$, звідки $\frac{M_2}{M_3} = \frac{1-c}{c}$, і далі $\frac{1}{1+M_3/M_2} = \frac{1}{1+\frac{c}{1-c}} = 1-c$. Отже, маємо:

$$\frac{1}{1+M_2/M_3} = c, \tag{1.54}$$

$$\frac{M_2}{M_3} = \frac{1-c}{c}, \tag{1.55}$$

$$\frac{1}{1+M_3/M_2} = 1-c. \tag{1.56}$$

З рівностей (1.52) і (1.55) і умови ранжування (1.42) виходять верхні оцінки для змінних b і c: $\frac{M_1}{M_3} = \frac{1-b}{b} >$ 1, звідки b <0,5; аналогічно, $\frac{M_2}{M_3} = \frac{1-c}{c} >$ 1, тобто c <0,5. У підсумку виходить, що верхня оцінка для всіх трьох змінних a,b,c дорівнює 0,5.

Для визначення двосторонніх оцінок змінних a,b,c спочатку отримаємо важливу рівність, що пов'язує ці змінні. З цією метою використовуємо тотожність $\frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{M_2}{M_3} = \frac{M_1}{M_3}$. Замінюючи відношення метрик їх виразами (1.49), (1.55), (1.52) через змінні a,b,c, замість згаданої вище тотожності отримаємо вираз

$$\frac{1-a}{a} \cdot \frac{1-c}{c} = \frac{1-b}{b}. \tag{1.57}$$

Цю рівність назвемо рівністю зв'язку змінних (РЗЗ). Далі приступимо до отримання нижніх оцінок для змінних b і c. Скористаємося нерівністю, що випливає з умови ранжування (42). Тоді справедливим є ланцюжок

$$\frac{M_3}{\sum_{i=1}^{3} M_i} < \frac{M_3}{3M_3} = \frac{1}{3} \Rightarrow M_3 < M_1 + M_2 + M_3 \Rightarrow \frac{2}{3} M_3 < \frac{1}{3}(M_1 + M_2) \Rightarrow M_3 < \frac{M_1 + M_2}{2}. \tag{1.58}$$

$$M_3 < \frac{M_1 + M_2}{2} \Rightarrow M_3 < \frac{1-b}{2b} M_3 + \frac{M_2}{2} \Rightarrow M_3 \left(\frac{2b-1+b}{2b} \right) < \frac{M_2}{2} \Rightarrow M_3 < \frac{bM_2}{3b-1},$$

звідки слід необхідно обмеження на величину b: b $> \frac{1}{3}$, в іншому випадку позитивна величина M_3 опинялася б менше негативної, що неможливо. Отже, для змінної b отримана вже двостороння оцінка:

$$\frac{1}{3} < b < \frac{1}{2}. \tag{1.59}$$

Корисно нагадати, що в ланцюжку нерівностей, з якого отримана оцінка (1.59), використана формула (1.52). Аналогічні дії необхідні і при отриманні нижньої оцінки для змінної c:

$$M_3 < \frac{M_1 + M_2}{2} \Rightarrow M_3 < \frac{M_1}{2} + \frac{1-c}{2c} M_3 \Rightarrow M_3\left(1 - \frac{1-c}{2c}\right) < \frac{M_1}{2} \Rightarrow M_3 \frac{3c-1}{2c} < \frac{M_1}{2} \Rightarrow M_3 < \frac{cM_1}{3c-1}.$$

З останньої нерівності цього ланцюжка слід обмеження на величину $c : c > \frac{1}{3}$. Значить, і для змінної c отримана двостороння оцінка:

$$\frac{1}{3} < c < \frac{1}{2}. \tag{1.60}$$

При отриманні оцінки (1.60) в ланцюжку нерівностей використана формула (1.55). Залишилося отримати двосторонню оцінку для змінної a. Але спочатку знайдемо для a нижню оцінку. Тут істотно використовується РЗЗ. Покажемо, що нижня оцінка змінної a дорівнює $\frac{1}{3}$. Доказ проведемо від супротивного, припустивши, що $a < \frac{1}{3}$. З рівності (1.57) знайдемо вираз для a. Отже,

$$\frac{1-a}{a} = \frac{c(1-b)}{b(1-c)} \Rightarrow a = \frac{1}{1 + \frac{c(1-b)}{b(1-c)}}.$$

Згідно з припущенням, маємо

$$1+\frac{c(1-b)}{b(1-c)}>3 \Rightarrow c-bc>2b-2bc \Rightarrow 2b-bc<c \Rightarrow b<\frac{c}{2-c}<\frac{0{,}5}{2-0{,}5}=\frac{1}{3} \Rightarrow b<\frac{1}{3}.$$

Прийшли до суперечності, так як, згідно з (1.59) $\frac{1}{3}<b$. У ланцюжку використана верхня оцінка для c, а саме c<0,5. Показано, що припущення виявилося помилковим, отже, отримали нижню оцінку для a і її двосторонню оцінку

$$\frac{1}{3}<a<\frac{1}{2}. \tag{1.61}$$

Таким чином, отримані двосторонні оцінки для всіх трьох змінних a,b,c. Але важливо також отримати нерівності, що зв'язують ці змінні як результат того, що вони позначають деякі вирази - функції від метрик $M_i(i=1,2,3)$, а також від введення в розгляд умови ранжування (1.42).

Отримаємо нерівності, що зв'язують змінні a,b,c. З позначень $\frac{1}{1+M_1/M_2}=a$ і $\frac{1}{1+M_1/M_3}=b$ слід, що $a>b$, так як $\frac{M_1}{M_2}<\frac{M_1}{M_3}$, бо $M_2>M_3$ згідно з умовою ранжування УР (1.42). Аналогічно з позначень $\frac{1}{1+M_2/M_3}=c$ і $\frac{1}{1+M_1/M_3}=b$ слідує, що $c>b$, оскільки $\frac{M_2}{M_3}<\frac{M_1}{M_3}$ через дії УР.

Отже, відомо, що $a>b$ і $c>b$. Порівняння величин a і c призводить до такого.

З позначень $\frac{1}{1+M_1/M_2}=a$ і $\frac{1}{1+M_2/M_3}=c$ слідує, що $a<c$ в разі, коли $\frac{M_1}{M_2}>\frac{M_2}{M_3}$ і $a>c$, якщо $\frac{M_1}{M_2}<\frac{M_2}{M_3}$. Отже, наявність УР призводить до ланцюжків нерівностей:

$$c>a>b \text{ за умови, що } \frac{M_1}{M_2}>\frac{M_2}{M_3} \text{ і} \tag{1.62}$$

$$a > c > b \text{ за умови, що } \frac{M_1}{M_2} < \frac{M_2}{M_3}. \tag{1.63}$$

Отримання виразів для ваг $\beta_i (i = 1,2,3)$ *як функцій змінних* a, b, c.

Після введення в розгляд змінних a, b, c – позначень виразів, що залежать від відносин метрик $M_i (i = 1,2,3)$, перетворені гіпотетичні рівності набувають інший вид, де фігурують введені змінні. Так, рівність (1.43) перетвориться до виду

$$\frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{a + 1 - c}{1 - a + 1 - b} = \frac{a + 1 - c}{2 - a - b}. \tag{1.64}$$

При переході від рівності (1.43) до (1.64) проведені заміни у правій частині рівності (1.43), позначені посиланнями (1.46), (1.56), (1.49) і (1.53). Аналогічно рівність (1.44) набуде такого вигляду:

$$\frac{\beta_3}{\beta_1} = \frac{b + c}{2 - a - b}. \tag{1.65}$$

Тут при переході від рівності (1.44) до (1.65) необхідні посилання на (1.47), (1.48), (1.49), (1.53). І, нарешті, рівність (1.45) перетвориться так:

$$\frac{\beta_3}{\beta_2} = \frac{b + c}{a + 1 - c}. \tag{1.66}$$

Перехід від рівності (1.45) до (1.66) зроблений із використанням посилань (1.47), (1.48), (1.49), (1.56). Необхідно також відзначити, що рівність (1.66) є очевидним наслідком рівності (1.64) і (1.65).

Далі ваги β_2 і β_3 визначаються в залежності від ваги β_1. Так, і з (1.64) випливає

$$\beta_2 = \frac{a+1-c}{2-a-b}\beta_1, \tag{1.67}$$

$$\beta_3 = \frac{b+c}{2-a-b}\beta_1. \tag{1.68}$$

Обумовлені ваги $\beta_i (i=1,2,3)$, за припущенням, пов'язані також умовою, що нормує

$$\sum_{i=1}^{3}\beta_i = 1. \tag{1.69}$$

Тепер легко знаходяться вирази для ваг $\beta_i (i=1,2,3)$. Для ваги β_1, з урахуванням умови (1.69), отримуємо

$$\beta_1 = \frac{2-a-b}{2-a-b+(a+1-c)+(b+c)} = \frac{2-a-c}{3}. \tag{1.70}$$

Підставляючи в вирази (67,68) отриману формулу (70) для β_1, отримуємо формули для ваг β_2 і β_3:

$$\beta_2 = \frac{a+1-c}{3}, \tag{1.71}$$

$$\beta_3 = \frac{b+c}{3}. \tag{1.72}$$

Цікавий той факт, що дроби – вирази для ваг $\beta_i (i=1,2,3)$ мають спільний знаменник, який представляє ціле число 3. Можливо, це пов'язано з тим, що в пропонованій моделі розглядається випадок саме трьох метрик.

Відзначимо, що отримані вирази (1.70), (1.71), (1.72) дозволяють чисельно розраховувати шукані ваги $\beta_i (i=1,2,3)$ відповідних метрик $M_i (i=1,2,3)$, підпорядкованих умові ранжування (1.42).

Приклад 1.2. Аналогічно до прикладу 1.1, розглянемо той самий атрибут живучість, що описується трьома метриками, які мають розрахункові значення: $M_1 = G(q^i) = 0{,}68$, $M_2 = D(q^i) = 0{,}2$, $M_3 = R(n) = 0{,}94$.

У такому випадку, відповідно до умові ранжування (1.62), (1.63), перепризначуємо нумерацію метрик у загальній сумі: $M_1 = G(q^i) = 0{,}94$, $M_2 = D(q^i) = 0{,}68$, $M_3 = R(n) = 0{,}2$. За формулами (1.70), (1.71), (1.72) значення $\beta_1 = 0{,}450991$, $\beta_2 = 0{,}397493$, $\beta_3 = 0{,}134237$, умова $\sum_{i=1}^{3} \beta_i M_i = 0{,}982722 \approx 1$ виконується.

Оціночне значення атрибута за виразом (1.37), з урахуванням сприятливості метрик, буде таким: $\beta_1 M_1 - \beta_2 M_2 + \beta_3 M_3 =$(0,68*0,333427)-(0,2*0,234634)+(0,94*0,431939)= 0,585827.

Таким чином, отримане числове значення для атрибута у майбутньому можливо використовувати для оцінки загального рівня гарантоздатності досліджуваної системи.

Області можливих значень змінних a, b, c

Необхідно також визначити області можливих значень аргументів функцій $\beta_i (i = 1,2,3)$. Опис таких областей стало можливим після отримання двосторонніх оцінок для змінних a, b, c згідно з посиланнями (1.59-1.61), а також ланцюжків нерівностей (1.62) і (1.63), що пов'язують ці змінні. Об'єднуючи ці два згадані результати, можна описати області можливих значень аргументів a, b, c за допомогою таких ланцюжків нерівностей:

$$\frac{1}{2} > c > a > b > \frac{1}{3}, \text{ якщо } \frac{M_1}{M_2} > \frac{M_2}{M_3}, \tag{1.73}$$

$$\frac{1}{2} > a > c > b > \frac{1}{3}, \text{ якщо } \frac{M_1}{M_2} < \frac{M_2}{M_3}. \tag{1.74}$$

До них має бути приєднано рівність зв'язку змінних (1.57). Якщо задати значення змінним a і c у згоді з (1.73) або (1.74), то значення змінної b визначається з рівності (1.57) за формулою

$$b = \frac{1}{1 + \frac{1-a}{a} \cdot \frac{1-c}{c}}. \tag{1.75}$$

Нерівності, що зв'язують ваги $\beta_i (i = 1,2,3)$

Оскільки дроби - вирази для ваг $\beta_i (i = 1,2,3)$ – (1.70), (1.71), (1.72), мають спільним знаменником число 3, то порівняння величин цих ваг зводиться до порівняння чисельників. Покажемо, що $\beta_1 > \beta_2$, тобто, що чисельник дробу (1.70) більше чисельника (1.71). Отже, доведемо справедливість такого ланцюжка нерівностей:

$$2 - a - b > a + 1 - c \Rightarrow 1 - 2a > b - c.$$

Остання нерівність задовольняється, так як усі змінні a, b, c менше 0,5. Нерівність $\beta_1 > \beta_2$ доведено. Тепер покажемо, що $\beta_2 > \beta_3$. Порівнюючи чисельники (1.71) і (1.72), маємо $a + 1 - c > b + c \Rightarrow 1 + a - b > 2c$, оскільки $a > b$. У підсумку справедливим є ланцюжок

$$\beta_1 > \beta_2 > \beta_3. \tag{1.76}$$

Цей ланцюжок можна інтерпретувати умовно як ранжування ваг $\beta_i (i = 1,2,3)$ внаслідок умови ранжирування (1.42) відповідних метрик $M_i (i = 1,2,3)$. Таким чином, показано, що більшої величині метрики відповідає і щонайбільше значення її ваги.

Взаємозв'язок умов ранжування і введення нових змінних a, b, c

У перетворених гіпотетичних рівностях (1.43) - (1.45) їх праві частини залежать від відносин метрик $M_i(i=1,2,3)$. Цих рівностей досить, щоб разом із нормуючою умовою $\sum_{i=1}^{3}\beta_i=1$ отримати вирази для ваг - функцій від аргументів, якими є відносини пар метрик $M_i(i=1,2,3)$.

Вдалим, як виявилося, рішення про позначення виразів від цих відносин (1.46-1.48) новими змінними a,b,c, що призвело до того, що ваги $\beta_i(i=1,2,3)$ стало можливим висловлювати як функції тільки цих введених змінних.

Головним фактором для визначення ваг метрик $M_i(i=1,2,3)$ стало запровадження в розгляд УР (1.42) значень цих метрик, де вони розташовуються в порядку убування значень, тобто, коли $M_{1>}M_2>M_3$.

Підсумки за методом 2

Наявність УР разом із введенням нових змінних дали можливість отримати нерівності, що зв'язують змінні a,b,c. Завдяки формулам (1.50), (1.52), (1.55) отримані верхні оцінки для a,b,c. Виявилося, що для всіх них верхня оцінка дорівнює 0,5.

Були визначені також вирази для $\frac{M_1}{M_2},\frac{M_1}{M_3},\frac{M_2}{M_3}$ згідно з посиланнями (1.49), (1.51), (1.55), звідки отримано важливу РЗЗ a,b,c (1.57). Далі були отримані двосторонні оцінки (1.59) і (1.60) для змінних b і c, а при отриманні такої ж оцінки (1.61) для змінної використовувалося РЗЗ. Важливим результатом є отримання ланцюжків нерівностей, що зв'язують як величини a,b,c, так і отримані для них двосторонні оцінки. Такими ланцюжками є (1.73) і (1.74). Ланцюжки визначають області можливих значень змінних a,b,c. З використанням формул для ваг $\beta_i(i=1,2,3)$, що залежать від аргументів a,b,c, показано, що має місце висновок, який інтуїтивно напрошується, що $\beta_1>\beta_2>\beta_3$, тобто показано, що більшої величини метрики відповідає і більша її вага.

Коротко підсумовуючи, можна стверджувати, що основою пропонованого підходу є умова ранжування і введення в розгляд нових змінних a,b,c. Визначивши області можливих значень цих змінних, які є аргументами функцій $\beta_i(i=1,2,3)$, можна чисельно знаходити значення ваг відповідних метрик за формулами (1.69), (1.70-1.72).

Також стало можливим задавати відношення метрик $\frac{M_1}{M_2},\frac{M_1}{M_3},\frac{M_2}{M_3}$ і зворотних відношень не довільно, а підраховуючи їх значення в залежності від вибору значень їх аргументів з областей (1.73) або (1.74). У цьому простежується зв'язок введення в систему умови ранжування і розгляд нових змінних a,b,c.

1.6 Порівняльна оцінка КС за рівнем гарантоздатності

Як відомо, атрибути АМГКС оцінюються за допомогою метрик , які являють собою або аналітичні вирази і мають кількісні оцінки (кількісні метрики), або носять описовий характер і мають якісні оцінки (якісні метрики). Так, серед наведеного вище набору атрибутів такі два атрибути, як конфіденційність і цілісність характеризуються виключно якісними метриками, що не виражаються аналітично і оцінюються за допомогою набору критеріїв оцінки, значення яких потім усереднюються.

Метою порівняння двох гарантоздатних систем S_1 та S_2 за рівнем гарантоздатності (РГС) пропонується численно оцінювати узагальнений показник гарантоздатності системи на основі ряду аналітичних виразів [45]. Якщо оперування кількісними метриками в цілому є зрозумілим, то облік якісних метрик в оцінці відповідного атрибута та РГС в цілому є актуальним завданням. Один із підходів до її вирішення, заснований на методі експертних оцінок, є предметом даної роботи.

З метою зручності подальших міркувань, змінимо порядок послідовності атрибутів таким чином: 1 – безвідмовність, 2 – готовність, 3 – обслуговуваність, 4 –живучість, 5 – достовірність, 6 – функціональна безпека, 7 – конфіденційність, 8 – цілісність.

Перші шість атрибутів мають кількісні метрики, які виражаються аналітично, а останні два атрибути містять метрики суто якісного типу.

Постановка задачі. Нехай є дві системи S_1 та S_2 з описаним вище набором атрибутів гарантоздатності. При цьому якісні метрики систем S_1 та S_2 збігаються, а кількісні - описуються однаковими аналітичними виразами, але з оцінками, які беруть різні чисельні значення. Ставиться завдання вибору системи з найвищим РГС.

Приклади переліків кількісних метрик по кожному з атрибутів наведені в [76].

Попередньо важливо відзначити, що обов'язковою умовою є визначення відносних ваг кожного показника кожного з рівнів. Ваги атрибутів надалі будемо називати впливом, тим самим підкресливши їх більш високий рівень. Впливи восьми показників високого рівня виходять точно таким же експертним шляхом, описаним раніше. Будемо вважати вже певними впливи атрибутів і позначимо їх B_i (i=1,…,m) (вплив i-го атрибута, в нашому випадку кількість атрибутів m=8). Експертні оцінки ваг метрик, що входять до відповідних атрибутів з номерами із 1-го по 6-й позначимо b_{ij} (вага j-й метрики i-го атрибута, j=1,…,n_{ij}). Кожна кількісна метрика, що входить в i-й атрибут, має вагу b_{ij} і має аналітичний вираз, наведений у [76].

Для порівняння між собою кількісних метрик введемо параметр D_{ij}, де i-й ідентифікаційний номер атрибуту, j – ідентифікаційний номер метрики, що входить в i-й атрибут. Для всіх кількісних метрик і параметрів D_{ij} в [76] наводяться відповідні аналітичні вирази. Вважаючи відомими ваги і впливи обох рівнів, розглянемо підхід до прийняття рішення про перевагу однієї із двох гарантоздатних систем.

1.6.1 Випадок кількісних метрик

Метрики представлені ідентичними аналітичними виразами в обох системах S_1 і S_2, але відрізняються, в найзагальнішому вигляді, значеннями показників.

Позначимо аналітичний вираз (формула, число), що представляє параметр D_{ij} як F_{ij} (i=1,…6). У прийнятих далі позначеннях дробів $\frac{f_{ij1}}{f_{ij2}}$ f_{ij1} та f_{ij2} являють собою результати підстановок в F_{ij} чисельних значень параметрів, відповідно, в системі S_1 та S_2.

Примітка 1.2. Якщо в деяких виразах міститься як аргумент момент часу t, то його значення повинні збігатися в однойменних виразах для обох систем.

Співвідношення $\frac{f_{ij1}}{f_{ij2}}$ як співвідношення чисел обчислюються за всіма параметрами D_{ij} кількісних метрик для конкретних заданих числових значень. Позначимо співвідношення $\frac{f_{ij1}}{f_{ij2}}$ як Q_{ij} (i=1,…6), (j=1,…,n_{ij}).

Обчислимо вираз

$$Q_{cp.\text{i}} = \sum_{j=1}^{n_{ij}} Q_{ij} \cdot b_{ij} \tag{1.77}$$

за всіма кількісними метриками i-го атрибута. Далі обчислимо вираз

$$Q_{cp.кіл.} = \sum_{i=1}^{6} Q_{cp.i} \cdot B_i\,, \tag{1.78}$$

де $\sum_{i=1}^{6} B_i = 1$ за всіма кількісними атрибутами для значень B_i (i=1,…6).

1.6.2 Випадок якісних метрик

Кожній якісній метриці відповідає набір критеріїв оцінки, кількість яких дорівнює k_{ij}. Рівень виконання критерію оцінки визначається величиною U_l (або K_l) (l=1,…,k_{ij}), яка знаходиться в діапазоні значень 0÷1. Оцінка рівня виконання критерію здійснюється таким чином:

- при повній відсутності виконання критерію – U_l = 0;
- при виконанні критерію на 10%-90% – U_l = 0,1-0,9;
- при 100% виконанні критерію – U_l =1.

Кількісною оцінкою якісної метрики є усереднена оцінка рівнів виконання її критеріїв, наприклад, $L_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^{k_{ij}} U_l}{k_{ij}}$, де i – номер якісного атрибута ; j – номер якісної метрики.

Примітка 1.3. Величину L_{ij} можливо уточнити експертним методом з використанням ваг критеріїв оцінки.

При порівнянні двох систем S_i (i=1,2) обчислимо співвідношення $\frac{L_{j1}}{L_{j2}}$ і використовуємо вже певні ваги якісних метрик b_{ij} (i=7,8).

Примітка 1.4. Суми ваг усіх якісних метрик 7-го і 8-го атрибутів рівні 1. Самі ваги b_{ij} можуть бути отримані також експертним методом.

Обчислимо вираз

$$Q_{cp.i} = \sum_{j=1}^{2} \frac{L_{j1}}{L_{j2}} \cdot b_{ij}\,, \tag{1.79}$$

за всіма якісними метриками i =7,8-го атрибутів. Далі обчислимо вираз

$$Q_{ср.як.} = \sum_{i=7}^{8} Q_{ср.i} \cdot B_i \,, \tag{1.80}$$

де $\sum_{i=7}^{8} B_i = 1$ за всіма якісними атрибутами для значень B_i (i =7,8).

Отримані величини $O_{ср.кіл.}$ та $Q_{ср.як.}$ служать для порівняння систем S_1 та S_2 за сукупністю оцінок, відповідно, кількісних і якісних атрибутів. Сума цих величин $R = O_{ср.кіл.} + \mathrm{Q}_{\text{ср.як.}}$ дозволяє зробити висновок про перевагу тієї чи іншої системи з точки зору гарантоздатності.

1.6.3 Рішення про перевагу систем

Нагадаємо, що під час розгляду співвідношення чисельних значень показників чисельник співвідношення відповідає системі S_1, його знаменник – системі S_2. Якщо $\mathrm{R} \geq 1$, слід віддати перевагу системі S_1, в іншому випадку - системі S_2 [45].

Примітка 1.5. При прийнятті рішення про перевагу тієї чи іншої системи необхідно мати на увазі, що для одних метрик зростання їх показника призводить до збільшення рівня РГС, а для інших метрик – до зменшення РГС.

Наприклад, метрики атрибута безвідмовність, такі як імовірність безвідмовної роботи відмовостійкої системи, ймовірність безвідмовної роботи ненадлишкових каналів системи, число працездатних конфігурацій системи і т.д. з ростом їх показника збільшують (сприяють) РГС. Метрики атрибута обслуговуваність, такі як тривалість технічного обслуговування, середній час відновлення і т.д. з ростом їх показника зменшують (не сприяють) РГС. Тому після присвоєння всім метрикам ідентифікаційних номерів при подальшому розгляді питання необхідно розділити множину I цих номерів на дві непересічні множини $I^{(+)}$ і $I^{(-)}$ відповідно номерам так званих сприятливих та несприятливих метрик.

Для довільного i-го атрибута (i=1,…6) введемо позначення: I_{ij}– множина номерів метрик i-го атрибутаа (j=1,… n_{ij}); $I_{ij}^{(+)}$ та $I_{ij}^{(-)}$ – відповідні підмножини сприятливих та несприятливих метрик множини I_{ij}. Об'єднання непересічних множин $I_{ij}^{(+)}$ і $I_{ij}^{(-)}$ збігається із множиною I_{ij}. Не виключено, що деякі множини $I_{ij}^{(-)}$ можуть виявитися порожніми.

Зауважимо, що введені раніше співвідношення $\frac{f_{ij1}}{f_{ij2}}$ чисельних значень, загальних для систем S_1 та S_2, позначені раніше як

$$\frac{f_{ij1}}{f_{ij2}} = Q_{ij} \ (i=1,\ldots 6),\ j \in I_{ij}^{(+)}. \tag{1.81}$$

З наступним їх «зважуванням» за відповідними вагами та знаходженням сум за індексом j, знаходиться сума, яка зменшується, коли індекс підсумовування $j \in I_{ij}^{(-)}$. Зменшення згаданої суми пов'язано з тим, що співвідношення $\frac{f_{ij1}}{f_{ij2}}$ при j, що належить множині $I_{ij}^{(-)}$, приймаються від’ємними.

З урахуванням позначень і поділу множини I_{ij} на дві його підмножини справедлива рівність

$$\sum_{j=1}^{n_{ij}} Q_{ij} b_{ij} = \sum_{j \in I_{ij}^{(+)}} Q_{ij} b_{ij} - \sum_{j \in I_{ij}^{(-)}} Q_{ij} b_{ij} \ (i=1,\ldots 6). \tag{1.82}$$

Відповідно до рівності (1.81), подальше «зважування» співвідношень $\frac{f_{ij1}}{f_{ij2}}$ за вагами атрибутів відбувається аналогічно вже представленому.

Стверджувати, що сума, яка стоїть у лівій частині рівності (1.82) завжди додатня, не можна. Правомірність цього твердження збільшується зі ступенем близькості систем, S_1 та S_2 за характеристиками гарантоздатності, що вимагає

уважного розгляду. Для випадку 7-го і 8-го якісних атрибутів всі метрики яких якісні, аналогічних проблем, пов'язаних з рівністю (1.82) не виникає.

Приклади розрахунку при здійсненні порівняльної оцінки рівня гарантоздатності наведені в Додатку В, п. В.2.

Вплив негативних співвідношень, що входять в (1.82), можна певною мірою зменшити заміною деяких метрик на інформаційно рівноцінні, але вони призводять до зростання РГС.

1.7 Кількісна оцінка рівня гарантоздатності КС

Враховуючи, що гарантоздатність як складна властивість системи являє собою комплексну характеристику, то для її оцінки можуть використовуватися дві моделі [53]:

• векторна, яка представляє собою набір векторів (характеристик), які оцінюють окремі властивості гарантоздатності (безвідмовність, готовність, живучість, обслуговуваність, достовірність, конфіденційність, цілісність, функціональну безпеку);

• скалярна, яка є узагальненою (інтегральною) оцінкою рівня гарантоздатності.

Скалярна модель може бути отримана на основі метричного підходу, при якому будується максимально деталізована модель гарантоздатності як ієрархія первинних і вторинних властивостей та їх характеристик, що визначаються набором метрик, оцінюваних експертним шляхом, шляхом обчислень або вимірювань. Далі проводиться згортка метрик за допомогою аналітичної моделі (функціонала) обґрунтованого виду.

Для більшості КС критичного призначення доцільно розглядати повний комплекс атрибутів АМГ, однак у деяких випадках, беручи до уваги специфіку функціонування КС, комплекс атрибутів можливо обґрунтовано мінімізувати.

Наприклад, слід виділити такі типи об'єктів спеціального призначення, для яких ряд атрибутів, що входять до складу АМГКС, доцільно вилучити з розгляду без втрати спільності:

1. Необслуговувані об'єкти короткого періоду функціонування (ракети, керовані снаряди і авіабомби).

2. Обслуговувані об'єкти короткого періоду функціонування (літаки, багаторазові космічні апарати).

3. Автономні необслуговувані об'єкти тривалого періоду функціонування (пункти управління підводними кабельними лініями зв'язку, супутники, зонди).

4. Автономні обслуговувані об'єкти тривалого періоду функціонування (кораблі, поїзди, шахтні пускові установки ракет).

Наприклад, для об'єктів 1-го типу неактуальними є такі атрибути: готовність, обслуговуваність, живучість, конфіденційність і цілісність, для яких експерти фактично повинні оцінити як дуже низькі коефіцієнти впливу.

1.7.1 Скалярна модель гарантоздатності системи

Згідно з визначенням поняття гарантоздатності, а саме гарантоздатність – це здатність системи надавати задані послуги, яким можливо виправдано довіряти. Заданими «послугами», у даному випадку, можна вважати метрики з їх нормативними значеннями, що задаються технічним завданням. У такому випадку запропонований комплексний показник (1.1), що базується на атрибутивній моделі, повинен враховувати критерії реалізації кожної з метрик системи.

Критерій реалізації метрики повинен враховувати встановлені в технічному завданні вимоги. Наприклад, встановлене мінімально допустиме значення ймовірності безвідмовної роботи відмовостійкої системи ${}^{f}_{c}R^{q}_{s\,\min}$ =0,996, а також максимально допустиме значення ${}^{f}_{c}R^{q}_{s\,\max}$ =1, а розраховане фактичне значення

параметра створюваної системи ${}_c^f R_s^q$=0,999. Тоді, для обчислення рівня реалізації метрики, за методом рівномірної оптимізації знаходиться взаємовідношення M_{11}, = (${}_c^f R_s^q$ - ${}_c^f R_{s\,\min}^q$)/(${}_c^f R_{s\,\max}^q$- ${}_c^f R_{s\,\min}^q$)=(0,999-0,996)/(1-0,996) =0,75.

Також, ця сама задача може бути вирішена дещо іншим експертним способом завдяки встановленню рівня виконання метрики у відсотковому відношенні.

Оскільки значення кожної метрики може бути обчислене декількома методами, такі значення можуть бути усереднені або ж обрано найбільш точний метод обчислення метрики.

Такий підхід проведення розрахунку рівня гарантоздатності розроблюваної системи дозволяє здійснювати порівняння різних варіантів реалізації та версій розроблюваної системи.

Для проведення оцінювання рівня гарантоздатності КС записуються атрибути та метрики, що будуть враховуватися при проведені розрахунку (таблиця 1.4).

Таблиця 1.4 – Атрибути та метрики гарантоздатної системи

№	Найменування атрибута	Метрики	Вплив	Границі
1	Безвідмовність	Ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкої системи ${}_c^f R_s^q$	+	0..1
		Ймовірність безвідмовної роботи ненадлишкового каналу системи $R_к(t)$	+	0..1
		Коефіцієнт відмовостійкості $K_{ВС}$	+	1..k
2	Готовність	Коефіцієнт готовності $K_г$	+	0..1
		Коефіцієнт оперативної готовності $K_{ог}$	+	0..1
3	Обслуговуваність	Тривалість технічного обслуговування $T_{то}$	-	1..t
		Середній час відновлення $T_в$	-	1..t

Продовження таблиці 1.4

		Коефіцієнт технічного використання $K_{тв}$	+	0..1
4	Живучість	Коефіцієнт живучості $G(q^i)$	+	0..1
		Коефіцієнт деградації $D(q^i)$	-	0..1
		Виживність системи $R(n)$	+	0..1
5	Достовірність	Ймовірність отримання достовірного результату в ході проведення обчислень $D = [d_{\bar{i}} \cdot_c^f R_s^q] \cdot k$	+	0..1
6	Функціональна безпека	Ймовірність безпечної роботи $R_{БР}(t)$	+	0..1
		Ймовірність небезпечної відмови $Q_{НВ}(t)$	-	0..1
		Середнє напрацювання на небезпечну відмову $T_{НВср}$	+	1..t
		Коефіцієнт безпеки $K_Б$	+	0..1
7	Конфіденційність	Ймовірність порушень $P_{\bar{i}}$	-	0..1
		Рівень доступності $L_Д$	+	0..1
		Рівень секретності L_C	+	0..1
8	Цілісність	Рівень цілісності обчислювальних ресурсів $L_{ОР}$	+	0..1
		Рівень цілісності програмних ресурсів $L_{ПР}$	+	0..1
		Рівень цілісності інформації $L_{ЦІ}$	+	0..1

Для кожного з атрибутів: для кожної метрики з кількісними значеннями розраховується, а для якісних експертним методом встановлюється критерій реалізації від 0 до 1; для кожної метрики експертним або розрахунковим методом встановлюється значення ваги β_{ij}.

У випадку, коли значення вагових коефіцієнтів β_{ij} визначаються експертним методом за п.1.4.2, таке оцінювання проводиться на етапі встановлення технічних вимог до розроблюваної системи.

Таким чином, β_{ij} залишаться незмінними у процесі розрахунку рівня гарантоздатності розроблюваної системи для різних варіантів її реалізації. Ваги β_{ij} визначають пріоритетність тих чи інших метрик з точки зору цільового призначення системи.

У випадку коли неможливо встановити вимоги пріоритетності метрик майбутньої системи, визначення β_{ij} може проводитися аналітичним методом у залежності їх взаємовпливу одна на одну, який детально розглянуто у п.1.4.3, для кожного атрибута обчислюється комплексна оцінка $A_i = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij}$.

Приклад 1.3. У даному прикладі розрахункові та нормативні значення метрик будуть прийняті як дані (табл. 1.5-1.12), оскільки їх обчислення передбачає наявність повної інформації про систему й вимагає врахування майже всіх ключових особливостей досліджуваної системи, що виходить за межі дисертаційної роботи. В наступних пунктах дисертації буде детально розглянуто розрахунок значень основних метрик гарантоздатних систем.

Таблиця 1.5 – Атрибут безвідмовність, $А_Б$

№	Метрика	Розраховане значення	Мінімальне значення	Максимальне значення	Рівень реалізації M_{ij}	Вплив	Вага β_{ij}	$\beta_{ij} M_{ij}$
1	${}_c^f R_s^q$	0,998	0,99	1	0,8	+	0,4	0,32
2	$R_к(t)$	0,96	0,9	1	0,6	+	0,2	0,12
3	K_{BC}	2,42	1	3	0,71	+	0,4	0,284

$$A_Б = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 0{,}724.$$

Таблиця 1.6 – Атрибут готовність, $А_Г$

№	Метрика	Розраховане значення	Мінімальне значення	Максимальне значення	Рівень реалізації M_{ij}	Вплив	Вага β_{ij}	$\beta_{ij}M_{ij}$
1	$K_г$	0,9994	0,99	1	0,94	+	0,3	0,282
2	$K_{ог}$	0,995	0,9	1	0,95	+	0,7	0,665

$$A_Г = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 0{,}947.$$

Таблиця 1.7 – Атрибут обслуговуваність, $А_О$

№	Метрика	Розраховане значення	Мінімальне значення	Максимальне значення	Рівень реалізації M_{ij}	Вплив	Вага β_{ij}	$\beta_{ij}M_{ij}$
1	$T_{то}$	30	50	10	0,5	-	0,3	0,15
2	$T_в$	2	3	1	0,5	-	0,4	0,2
3	$K_{тв}$	0,9994	0,99	1	0,94	+	0,3	0,376

$$A_O = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 0{,}206.$$

Таблиця 1.8 – Атрибут живучість, $А_Ж$

№	Метрика	Розраховане значення	Мінімальне значення	Максимальне значення	Рівень реалізації M_{ij}	Вплив	Вага β_{ij}	$\beta_{ij}M_{ij}$
1	$G(q^i)$	0,9	0,6	1	0,75	+	0,3	0,225
2	$D(q^i)$	0,2	0,3	0,1	0,5	-	0,3	0,15

Продовження таблиці 1.8

3	$R(n)$	0,997	0,99	1	0,7	+	0,4	0,28

$$A_{Ж} = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 0,*355.$$

Таблиця 1.9 – Атрибут достовірність, $А_Д$

№	Метрика	Розрахова-не значення	Мінімаль-не значення	Максима-льне значення	Рівень реалізації M_{ij}	Вплив	Вага β_{ij}	$\beta_{ij} M_{ij}$
1	D	0,998	0,99	1	0,8	+	1	0,8

$$A_{Д} = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 0,8.$$

Таблиця 1.10 – Атрибут функціональна безпека, $А_{ФБ}$

№	Метрика	Розрахова-не значення	Мінімаль-не значення	Максима-льне значення	Рівень реалізації M_{ij}	Вплив	Вага β_{ij}	$\beta_{ij} M_{ij}$
1	$R_{БР}(t)$	0,9997	0,999	1	0,7	+	0,4	0,28
2	$Q_{НВ}(t)$	0,0002	0,0004	0	0,5	-	0,3	0,15
3	$T_{НВср}$	55000	30000	60000	0,83	+	0,2	0,166
4	$K_{Б}$	0,988	0,9	1	0,88	+	0,1	0,088

$$A_{ФБ} = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 0,684.$$

Оскільки метрики атрибутів конфіденційність та цілісність є якісними, то, кожній метриці конфіденційності відповідає набір критеріїв, за якими відбувається

оцінка конфіденційності ГКС (Додаток В, п. В.4.3). Значення метрик у такому випадку визначається експертним методом, описаним у п.1.4.1.

Таблиця 1.11 – Атрибут конфіденційність, $А_К$

№	Метрика	Розраховане значення	Мінімальне значення	Максимальне значення	Рівень реалізації M_{ij}	Вплив	Вага β_{ij}	$\beta_{ij}M_{ij}$
1	$P_П$	0,03	0,05	0	0,4	-	0,3	0,12
2	$L_Д$	0,99	0,9	1	0,9	+	0,5	0,45
3	$L_С$	0,995	0,99	1	0,5	+	0,2	0,1

$$A_K = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = 0{,}43.$$

Таблиця 1.12 – Атрибут цілісність, $А_Ц$

№	Метрика	Розраховане значення	Мінімальне значення	Максимальне значення	Рівень реалізації M_{ij}	Вплив	Вага β_{ij}	$\beta_{ij}M_{ij}$
1	$L_{ОР}$	0,95	0,9	1	0,5	-	0,3	0,15
2	$L_{ПР}$	0,91	0,9	1	0,1	+	0,5	0,05
3	$L_{Щ}$	0,93	0,9	1	0,3	+	0,2	0,06

$$A_Ц = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij} = -0{,}04.$$

На основі комплексних оцінок атрибутів обчислюється комплексна оцінка системи. Для цього:

- для кожного атрибута експертним методом встановлюється значення коефіцієнта впливу B_i, яке залишиться незмінним у процесі розрахунку рівня гарантоздатності розроблюваної системи для різних варіантів її реалізації;

- загальна комплексна оцінка обчислюється за формулою $G_{(AM)} = \sum_{i=1}^{n} B_i \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij} M_{ij}$.

Для наведеного прикладу, коли експертним методом, згідно з п. 1.4.1., встановлено вагові коефіцієнти атрибутів (табл. 1.13) маємо:

Таблиця 1.13 – Вагові коефіцієнти атрибутів системи

$B_Б$	$B_Г$	$B_О$	$B_Ж$	$B_Д$	$B_{ФБ}$	$B_К$	$B_Ц$
0,25	0,1	0,05	0,1	0,15	0,15	0,1	0,1

$G_{(AM)}$ = $B_Б A_Б + B_Г A_Г + B_О A_О + B_Ж A_Ж + B_Д A_Д + B_{ФБ} A_{ФБ} + B_К A_К + B_Ц A_Ц$ = 0,25·0,724 + 0,1·0,947 + 0,05·0,206 + 0,1·0,355+ 0,15·0,8 + 0,15·0,684 + 0,1·0,43 - 0,1·0,04 =0,59185.

При проведенні підрахунку для інших варіантів реалізації системи при незмінних вагових коефіцієнтах метрик β_{ij} та атрибутів B_i отримані дані будуть відображати зміну рівнів виконання кожного з атрибутів гаратнтоздатної системи та рівня гарантоздатності в цілому.

Таким чином, отримавши числові значення рівнів гарантоздатності досліджуваної системи, можливо проводити змістовний аналіз досліджуваної системи, а також виносити рішення щодо переваги того чи іншого варіанта реалізації гарантоздатної системи.

1.8 Методи забезпечення гарантоздатності КС

Розглянувши основні властивості та характеристики гарантоздатних КС, слід описати методи щодо їх реалізування. Відповідно до таксономії [45], основним засобом (базовою платформою) забезпечення властивостей гарантоздатності є відмовостійкість. Основними загрозами гарантоздатних систем є дефекти (faults),

помилки (errors), уразливості (vulnerabilities) і відмови (failures), які умовно можливо розділити на групи:

- дефекти розробки та проектування (development or design faults);
- фізичні дефекти (physical faults);
- дефекти зовнішніх впливів (взаємодії) (interaction faults).

Тому процес забезпечення відмовостійкості [36, 37, 57] базується на реалізації ланцюжка операцій/дій, спрямованих на:

- прогнозування несправностей на різних стадіях (fault forecasting);
- попередження виникнення несправностей (fault prevention);
- виявлення можливих помилок, дефектів, відмов (fault detection);
- ідентифікацію ознак, пов’язаних із відмовами (fault diagnosis);
- парирування відмов (fault tolerance);
- відключення елементів/частин, що відмовили (fault isolation), ізолювання спотвореної інформації тощо;
- реконфігурація структури та видалення несправностей (fault removal);
- відновлення обчислювального процесу (fault recovery).

Дії для досягнення відмовостійкості можуть реалізовуватись одночасно і утворювати певний цикл, починаючи від постановки технічного завдання на створення системи і закінчуючи її утилізацією.

Виходячи з операцій/дій, які застосовуються для досягнення гарантоздатності, можна запропонувати такі методи, направлені на реалізацію вказаних операцій/дій, а саме:

- введення різного типу надмірності та резервування (розглядається у розділі 2.2-2.4), в тому числі інфраструктурного резервування як методу підвищення живучості (розглядається у розд. 2.5);
- застосування багатоверсійності технології, направленої на мінімізацію дефектів розробки та проектування, дефектів взаємодії та фізичних дефектів (у тому числі N-версійне програмування, розглядається у розд. 2.3);
- збільшення кількості працездатних станів системи та мінімізація її непрацездатних/небезпечних станів, а також мінімізація ймовірних переходів між

працездатними і непрацездатними станами, таких як дефекти, помилки, уразливості і відмови.

До опосередкованих методів, які забезпечують гарантоздатність, слід віднести перехід до концепції відмовобезпеки як альтернативи відмовостійкості та засобу досягнення підвищеної безпеки (розглядається у розд. 2.1) та здійснення управління процесом забезпечення гарантоздатності.

Забезпечення безвідмовності

Безвідмовність є ключовою властивістю ГКС, яка достатньо широко описана в теорії надійності. Забезпечення безвідмовності в КС пов'язано з боротьбою зі усім спектром помилок, дефектів, уразливостей та відмов на різних етапах життєвого циклу системи.

Методи вирішення задач підвищення безвідмовності полягають у підвищенні надійності, розробці та використанні високонадійної елементної бази;
реалізації нових видів резервування; розробці алгоритмів, направлених на підвищення ступеня компенсації наслідків відмов; проведенні оцінювання надійності та здійснення моделювання надійності на різних етапах життєвого циклу; проектуванні відмовостійкого програмного забезпечення.

Забезпечення обслуговуваності

Узагальненою задачею забезпечення обслуговуваності є зменшення часу технічного обслуговування та відновлення, що стає доступним при своєчасному виявленні дефектів і відмов.

З метою забезпечення високого рівня обслуговуваності необхідні: впровадження різних методів (у тому числі математичних) діагностування складних КС та інфраструктур на всіх етапах життєвого циклу; побудова інтелектуальних систем діагностування; розвиток засобів моделювання, виявлення та локалізація дефектів; розробка формалізованих методів верифікації програмного забезпечення; перехід обслуговування до концепції non-stop.

Забезпечення готовності

У деякій мірі основні показники готовності мають складовими показникі безвідмовності та обслуговуваності. Тому забезпечення високого рівня готовності

досягається за рахунок збільшення рівня безвідмовності (див. вище) та поліпшення системи обслуговування шляхом здійснення безперервного контролю за технічним станом системи, оптимізації періодичності і обсягу технічного обслуговування та зменшення часу відновлення.

Забезпечення живучості

Живучість, здебільшого, розглядається як частина гарантоздатності, коли допустимою є деградація кількості і якості надання послуг.

З метою забезпечення живучості застосовується впровадження технологій інфраструктурного резервування; технологій топологічної оптимізації структури; збільшення кількості працездатних станів системи та мінімізації її непрацездатних станів; розробка інноваційних технологій відновлення; впровадження технологій керованої багатоступеневої деградації; розробка моделей управління ризиками.

Забезпечення функціональної безпеки

Методи і засоби забезпечення безпеки систем критичного використання, як правило, направлені на боротьбу з ризиком і компенсацією його проявів та націлені на дотримання його певного рівня. Можливо вирізнити дві складові такої безпеки - інформаційну й функціональну. Отже, методи слід розділити на дві групи: організаційні та технічні.

До організаційних методів відносяться: управління проектами, документування, реалізація життєвого циклу забезпечення безпеки, використання передових методів і стандартів, використання сертифікованого матзабезпечення, контроль якості виробництва апаратних і програмних компонентів, використання різного типу настанов та стандартів для розробки специфікацій та дизайну.

Технічні методи включають у себе використання надмірності і резервування, поділ і незалежність, багатоверсійність, захист від внутрішніх і зовнішніх небезпек, інженерію людино-машинного інтерфейсу, а також різних видів самодіагностики та контролю.

Також приділяється окрема увага впровадженню методів, направлених на запобігання внутрішнім та зовнішнім втручанням (атакам).

Забезпечення достовірності

Відповідно до джерел спотворення інформації: домашинних (операторських), програмних та апаратних, організовуються засоби забезпечення достовірності.

Щодо програмних методів обробки даних, це такі види контролю: за шаблонами, за структурою даних, контроль меж, тобто допустимість значень даних, за взаємозв'язком даних, синтаксичний, семантичний контроль, балансові методи контролю. Найпоширенішим є введення у процес обчислення числових кодів із надмірністю.

До апаратних методів контролю відносяться: використання схем порівняння інформації в каналах обробки даних, контрольне підсумовування, циклічний контроль, контроль парності, контроль за модулем та ін.

Забезпечення конфіденційності

З метою забезпечення конфіденційності реалізуються заходи, направлені на контроль за апаратною частиною, програмним забезпеченням та опосередковано за середовищем, у якому працює система.

Методи забезпечення конфіденційності повинні охоплювати: обладнання, програми, дані та користувачів. Підвищення рівня конфіденційності знаходиться у прямій залежності від зниження рівня загроз порушень, а також заздалегідь встановлених рівнів доступності та секретності. Методи й рішення забезпечення конфіденційності КС, що застосовуються до апаратної частини КС включають: обмеження доступу, захист каналів зв’язку, фізичний захист архітектури. Стосовно конфіденційності програмного забезпечення методи та рішення включають: управління доступом, ідентифікацію та аутентифікацію, протоколювання, аудит, повторне виконання об’єктів, точність комунікацій, обмін даними.

З метою керування рівнем конфіденційності в системі та середовищі, у якому вона працює, організовуються системні та процедурні рішення, спрямовані на забезпечення правильності та безпеки експлуатації обчислювальних ресурсів; здатності перевірки і збереження даних; функцій контролю конфіденційності; захисту конфіденційності при роботі в мережах.

Рішення задачі вдосконалення методик підвищення рівня конфіденційності КС пов'язано з описанням як найбільш точних моделей поведінки порушника та знищення більшості можливих каналів несанкціонованого доступу.

Забезпечення цілісності

Оскільки працездатність і безпека КС безпосередньо залежать від інформації, яка в них обробляється, то слід розділяти цілісність самої КС і цілісність інформації. Цілісність КС обумовлюється цілісністю обчислювальних і програмних ресурсів.

Забезпечення високого рівня цілісності КС стає можливим завдяки слідуванню принципам та використанню механізмів забезпечення цілісності КС [77]. Принципами, на яких базуються методи забезпечення цілісності, є реконфігурація, ідентифікація, авторизація, відповідальність, обмеження, моніторинг, оповіщення, оборотність дій, мінімізація ризиків виникнення загроз. Методи забезпечення цілісності полягають у встановленні політик для входу, доступу, для санкціонованих дій, розподілу ресурсів, для відмовостійкості. Можливо відмітити, що принципи забезпечення цілісності багато в чому є спільними як для конфіденційності, так і для безпеки в цілому.

Характерними засобами підвищення цілісності є реалізація функцій в ПЗ з відновлення процесу виконання в разі збою операційної системи, процесора, зовнішніх пристроїв; засобів відновлення процесу в разі збоїв обладнання;
можливості повторного старту з точки зупинки; автоматичного резервування для збереження поточного стану; сумісності з технічними та системними програмними засобами; обробки помилкових ситуацій.

Для забезпечення цілісності системи здійснюється контроль вхідної і вихідної інформації на достовірність, точність, якість, своєчасність та правильність.

У підсумку слід зазначити, що впровадження методів забезпечення гарантоздатності є комплексною задачею і повинно знаходити своє якісне або кількісне відображення у позитивній зміні значень атрибутів та метрик розроблюваної системи.

1.9 Висновки до розділу 1

1. На основі проведеного аналізу сучасних проблем створення гарантоздатних комп'ютерних систем (ГКС) зроблено висновки про необхідність застосування комплексного підходу до їх вирішення на платформі нової відмовостійкої структури.

2. Удосконалено атрибутивну модель гарантоздатності КС (АМГКС) шляхом введення до складу моделі атрибута достовірність, що визначає ймовірність отримання достовірного результату в ході проведення обчислень.

3. Виконано розгорнуту декомпозицію АМГКС на атрибути, метрики і критерії оцінки рівня реалізації окремих характеристик.

4. Завдяки отриманій АМГКС та на основі метричного підходу розроблено оригінальну методологію кількісного оцінювання рівня гарантоздатності КС.

5. Запропоновано два аналітичних методи кількісної оцінки вагових коефіцієнтів гарантоздатної КС, що базуються на взаємовідношенні метрик гарантоздатної системи. Для випадку, коли значення метрик мають якісні оцінки, запропоновано експертний метод оцінювання вагових коефіцієнтів.

6. На основі метричного підходу розроблено оригінальну скалярну математичну модель кількісного оцінювання загального рівня гарантоздатності КС, записаної у вигляді лінійного функціонала.

7. Розроблено процедуру порівняльної оцінки КС з боку досягнутого рівня гарантоздатності різних варіантів їх виконання у процесі проектування.

Основні результати розділу опубліковані автором у роботах [11, 15, 23].

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ВІДМОВОСТІЙКОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ З КВАЗІМІСТКОВОЮ СТРУКТУРОЮ

2.1 Стратегія відмовобезпеки як альтернатива повній відмовостійкості КС

2.1.1 Відмовостійкість

Необхідною ознакою гарантоздатних систем є відмовостійкість (Fault-tolerance), оскільки ця властивість безпосередньо або частково впливає на такі атрибути, як безвідмовність, готовність, живучість і функціональну безпеку. Крім того, відмовостійкість базується на структурній надлишковості та методах багатоверсійного проектування, визначає рівень гарантоздатності обчислень, що виконуються програмними засобами ГКС.

У переважній більшості створення відмовостійких ГКС супроводжується високою вартістю, а затрати на розробку таких систем є складними і довготривалими, що вимагає значних затрат і стає суттєвою перешкодою в реалізації проекту. У випадках, коли створювана система критичного призначення являє собою досить обмежений у бюджеті проект, пропонується таке рішення.

Твердження 2.1. У випадках, коли існує безпечна можливість призупинення надання системою послуг або надання їх не в повному обсязі, доцільною є заміна повної відмовостійкості на часткову відмовостійкість з метою забезпечення безпеки функціонування при обмежених витратах на розробку та реалізацію проекту.

Таку часткову відмовостійкість пропонується означити як відмовобезпеку. Використання підходу, при якому стратегія повної відмовостійкості замінюється стратегією відмовобезпеки, дозволяє будувати економічно ефективні ГКС з меншими технічними витратами, доповнивши їх системою попереджувального технічного обслуговування для підвищення рівня безпеки. Особливістю стратегії відмовобезпеки, на відміну від стратегії повної відмовостійкості, є те, що вона допускає наявність відмов системи, але тільки таких, при яких система переходить у

захисний безпечний стан і повністю виключає появу таких відмов, при яких вона переходить у небезпечний стан, що супроводжується катастрофічними наслідками. Розглянемо більш докладно особливості реалізації цих двох підходів у забезпеченні безпеки ГКС.

Відмовостійкість – властивість технічної системи зберігати свою працездатність після відмови одного або декількох складових компонентів. Відмовостійкість визначається кількістю будь-яких послідовних одиничних відмов компонентів, після яких зберігається працездатність системи в цілому.

Основний спосіб реалізації відмовостійкості – введення надлишковості. Повна відмовостійка інженерія – це метод проектування відмовостійких систем, здатних продовжувати виконання запланованих операцій при відмові їх компонентів [77]. У цьому випадку повністю відмовостійкою системою є система, кожен компонент якої може продовжувати працювати при відмові однієї з його складових.

Стратегія повної відмовостійкості заснована на введенні надлишковості у структуру системи. Надлишковістю називають функціональність, в якій немає необхідності при безвідмовній роботі системи [79]. Тобто, надлишковість являє собою засіб підвищення надійності виробів та виключення шкідливого впливу на кінцевий результат завад та збоїв, що виникають під час роботи. Існують два типи надлишковості [80]: просторова й часова.

Просторова надлишковість реалізується шляхом введення додаткових компонентів, функцій або даних, які не потрібні при безвідмовному функціонуванні. Додаткові (надлишкові) компоненти можуть бути апаратними, програмними та інформаційними.

Часова надлишковість реалізується шляхом повторних обчислень або відправки даних, після чого результат порівнюється зі збереженою копією попереднього результату.

Примітка 2.1. Іноді забезпечення відмовостійкості ГКС вимагає, щоб частини, які вийшли з ладу, були вилучені і замінені новими в той час, як система продовжує працювати («гаряча» заміна). Ця заміна реалізується за умови, що середній час між

відмовами досить великий, щоб оператори змогли встигнути виконати ремонт до того, як резервна частина також вийде з ладу.

Найбільш ефективний метод введення надлишковості - апаратна надлишковість, яка досягається шляхом резервування (навантаженого і ненавантаженого). Проектування кожного компонента ГКС як відмовостійкого привносить у систему деякі недоліки, такі як збільшення ваги, вартості, енергоспоживання, ціни і часу, витраченого на проектування, перевірку і випробування. Показниками, що характеризують відмовостійкість системи, рекомендуються такі (п.1.3.1, формули 1.1-1.6).

2.1.2 Відмовобезпека

Починаючи з введення понять і визначень варто відмітити, що математичний апарат синтезу і аналізу в рамках стратегії відмовобезпеки, належить професорам Петербурзького державного університету шляхів сполучення – братам Сапожникову В.А. і Сапожникову Вл.А. [81, 82]. Розглянемо даний напрям стосовно проектування та створення ГКС.

Алгоритм роботи ГКС у рамках даної стратегії має виключати небезпечні ситуації не тільки при справному, але і при несправному стані самої системи. Внутрішні відмови системи не повинні призводити до небезпечних спотворень алгоритму її роботи. Сформулюємо базові поняття стратегії відмовобезпеки.

Визначення 2.1. Захисний стан (Protective State) – непрацездатний стан системи, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції щодо забезпечення безпеки, відповідають вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації (НТД, КД).

Визначення 2.2. Небезпечний стан (Hazardous State) – непрацездатний стан системи, при якому значення хоча б одного параметра, що характеризує здатність

виконувати задані функції щодо забезпечення безпеки, не відповідає вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документацій.

Визначення 2.3. Захисна відмова (Protective Failure) – подія, що полягає в порушенні працездатного стану системи при збереженні захисного стану.

Визначення 2.4. Небезпечна відмова (Hazardous Failure) - подія, що полягає в порушенні працездатного і захисного станів системи.

При оцінці безпеки в роботі [83] виходять з поняття безпечного стану, яке може прийняти система або її компонент. У цьому стані виключена небезпека з боку системи. В роботі [84] безпека технічного пристрою розглядається як його властивість перебувати у штатному або позаштатному безпечному стані. Під штатним розуміється стан, коли технологічний процес розвивається відповідно до заданого алгоритму, що визначає адекватну реакцію системи управління на зовнішні чинники.

Визначення 2.5. Безпечний стан (Safe state) – стан деякої системи, в якому при певних припущеннях і заданих умовах відсутня загроза для життя людей, економіки і навколишнього середовища.

Визначення 2.6. Безпека (Safety) – властивість системи, що виражається в очікуванні того, що вона за певних умов не перейде у стан, в якому загрозі піддається людське життя, економіка і навколишнє середовище.

Порівнюючи наведені визначення, можна зробити висновок про їх еквівалентність, оскільки вони засновані на єдиному підході - властивість безпеки визначається через стан системи. Конструктивність цього підходу полягає в тому, що він дає спосіб вирішення основного питання, яке виникає при аналізі і синтезі безпечних систем. Для цього сформулюємо поняття критерій небезпечної відмови.

Визначення 2.7. Критерій небезпечної відмови (Hazardous Failure Criterion) [18] – ознака або сукупність ознак небезпечного стану системи, встановлених у нормативно-технічній і (або) конструкторській документаціях.

Отже, внутрішня безпека КС – властивість системи зберігати справний, працездатний і захисний стан. У той же час безвідмовність – це властивість зберігати справний і працездатний стан. Тому в безпечній ГКС внутрішня безпека

виступає як складова надійності спільно з безвідмовністю, довговічністю, ремонтопридатністю та збереженістю.

Безвідмовність (БВ) характеризується множиною станів: C - справний, $П$ - працездатний

$$S_{БВ} = S_C \cup S_{П,} \tag{2.1}$$

а безпека (БЗ) – множиною станів: С – справний, П – працездатний, З – захисний,

$$S_{БЗ} = S_C \cup S_П \cup S_З. \tag{2.2}$$

З порівняння множин $S_{БВ}$ та $S_{БЗ}$ (2.1), (2.2) випливає, що безпека завжди більше безвідмовності. В деякому граничному випадку вони рівні, якщо будь-яка відмова в системі є небезпечною. Таким чином, на підставі вищевикладеного сформулюємо визначення стосовно відмовобезпеки.

Визначення 2.8. Відмовобезпека (Failure safety) – властивість технічної системи при відмові її деяких частин переходити в режим роботи, що не представляє небезпеки для людей, навколишнього середовища або матеріальних цінностей.

2.1.3 Концепція безпеки комп'ютерних систем

Під концепцією безпеки розуміється сукупність положень, відповідно до яких здійснюється побудова безпечної системи [19]. Безпечна система повинна задовольняти заданим рівням безпеки. Рівень безпеки визначається граничними значеннями показників безпеки. Показники безпеки складають кількісну характеристику властивостей безпеки.

Концепція безпеки [20] має фундаментальне значення, оскільки на її основі встановлюються критерії небезпечних відмов. Для реалізації концепцій безпеки

використовують дві стратегії: безвідмовність (Reliability) і відмовостійкість. Ці стратегії мають на увазі, що система, яка правильно виконує свій алгоритм функціонування, безпечна. Стратегія відмовобезпеки використовується спеціально для систем критичного призначення і полягає в переведенні системи із справного стану S_C у захисний незворотний стан $S_З$ при появі відмов (рис. 2.1). Але в той же час, при недостатньому визначенні параметрів множин працездатних станів $S_П^i$ - $S_П^j$ та критеріїв захисних відмов існує ймовірність переходу системи в небезпечний стан $S_{НБ}$ (малоймовірні події зображені пунктиром).

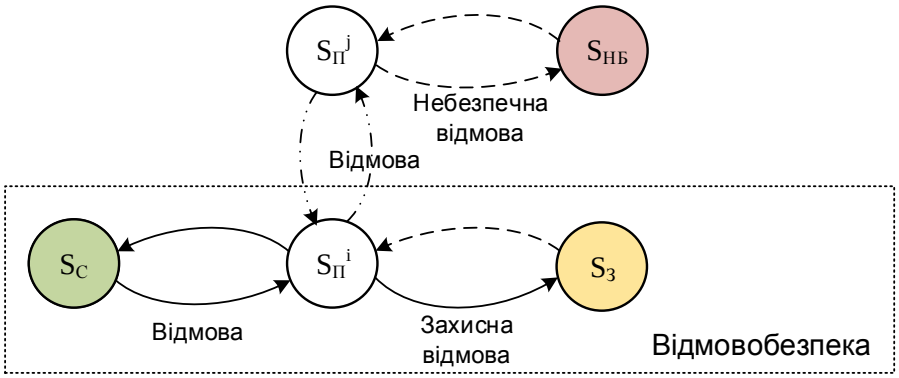


Рисунок 2.1 – Граф переходів у відмовобезпечній системі

Примітка 2.2. Зворотний перехід у працездатний стан із захисного стану виключається чи малоймовірний і здійснюється штучно, зазвичай з участю людини-оператора.

При побудові сучасних ГКС стратегія відмовобезпеки часто використовується спільно зі стратегією відмовостійкості або самостійно, так як є самодостатньою. Якщо при виникненні відмов система вичерпала свої резервні можливості і в результаті деградації та реконфігурації перестала бути відмовостійкою, то при появі ще однієї відмови вона повинна необоротно перейти в захисний стан (наприклад, відключений від об'єктів управління).

Визначення 2.9. Стратегія відмовобезпеки – поодинокі дефекти апаратних і програмних засобів не повинні призводити до небезпечних відмов і повинні виявлятися

з заданою вірогідністю на робочих або тестових впливах не пізніше, ніж у системі виникне другий дефект [81].

2.1.4 Критерії небезпечних відмов

Критерії небезпечних відмов встановлюють у нормативно-технічній документації для однозначного визначення небезпечних станів елементів, пристроїв і систем. Ці критерії використовуються в подальшому при доказі безпеки КС на всіх стадіях її життєвого циклу при розробці, випробуваннях, експлуатації та ремонті.

Визначаючи критерії небезпечних відмов, слід враховувати вид, призначення та структуру пристроїв ГКС, вимоги з безпеки, що пред'являються до ГКС, концепцію безпеки, прийняту при розробці, наслідки небезпечних відмов, властивості застосовуваних матеріалів та ін.

Визначення 2.10. Для аналогових і частини цифрових пристроїв формальним критерієм небезпечних відмов є вихід значень показників якості функціонування, що впливають на безпеку, за межі встановлених норм.

Визначення 2.11. Для цифрових пристроїв КС формальні критерії небезпечних відмов пов'язані із спотвореннями їх алгоритмів функціонування.

У загальному випадку алгоритм роботи цифрової системи задається з використанням вхідних і вихідних послідовностей (слів). Якщо ці послідовності нескінченні, то для їх завдання застосовують різні формалізовані мови (регулярні вирази, таблиці переходів, граф - схеми алгоритмів та ін.). Тоді алгоритм представляють за допомогою деякої математичної конструкції *E*. Це можуть бути вираз, граф станів, ланцюжки символів спеціального виду та ін. При синтезі безпечної системи небезпечні спотворення її алгоритму повинні бути записані з використанням спеціальних конструкцій на тій же мові. Відсутність небезпечних ситуацій ($E_{НБ}$) у відповідальному технологічному процесі гарантується умовою

$$E \cap E_{НБ} = \emptyset . \qquad (2.3)$$

При виникненні внутрішніх відмов відбувається спотворення алгоритму роботи системи виду $E \Rightarrow E'$. Тоді відмова є безпечною, якщо

$$E' \cap E_{НБ} = \emptyset . \qquad (2.4)$$

Загальна математична постановка задачі синтезу безпечної системи полягає в тому, що потрібно забезпечити виконання умов (2.3) і (2.4).

Умова (2.3) задовольняється в результаті повноти врахування всіх станів технологічного процесу, пов'язаних із виникненням небезпечних ситуацій. Принципово це, очевидно, завжди може бути виконано. Принципова можливість виконання умови (2.4) доведена в роботі [82]. Процедури перевірки умов (2.3) і (2.4) є змістом експериментів (натурних або імітаційних), які проводяться при випробуваннях на безпеку ГКС. За допомогою комп'ютерних технологій перевіряються на безпеку технологічні алгоритми і робота систем при виникненні відмов. При формулюванні критеріїв небезпечних відмов для ГКС ознаки небезпечних станів визначаються внаслідок порушення положень концепції безпеки, відповідно до якої побудована система.

2.2 Класифікація двоканальних відмовостійких структур КС

Найбільш економічним способом введення надмірності, що забезпечує досить високий рівень достовірності функціонування, є спосіб дублювання частин системи, які перебувають у навантаженому («гарячому») резерві.

2.2.1 Вимоги до відмовостійких і відмовобезпечних структур КС

Вимоги, що ставляться стратегіями повної відмовостійкості і відмовобезпеки до структур КС, які їх реалізують, відрізняються.

1. Відмовостійка структура конструюється таким чином, що вона завжди залишається готовою до роботи при будь-яких подіях (відмовах або збоях у роботі її функціональних блоків (ФБ)). Така властивість досягається за рахунок організації двоканальної структури з поблочним дублюванням і режимом функціонування Non-Stop, що забезпечує «гарячу» заміну ФБ, які відмовили без припинення функціонування системи. Це забезпечується використанням відновлюючих органів (ВО) на виході структури, що мають, з точки зору надійності, логічну функцію «АБО». Методи забезпечення відмовостійкості з використанням резервування більш прості і очевидні з точки зору доказу досягнутого рівня відмовостійкості.

2. Відмовобезпечна структура при виникненні відмови або збою будь-якого ФБ, що входить до складу кожного з каналів (якщо він не забезпечений функцією самовідновлення), переходить у захисний стан, що не чинить небезпеки для людей, навколишнього середовища або матеріальних цінностей. Це забезпечується використанням відновлюючих органів (ВО) на виході структури, що мають, з точки зору надійності, логічну функцію «І».

3. Структура змішаного типу (відмовостійка та відмовобезпечна) має властивості обох описаних вище структур. Реалізація такої структури стала можливою за рахунок використання особливого типу ВО (як на виході структури, так і на виходах кожного з дубльованих ФБ), що має, з точки зору надійності, комбіновану функцію «І/АБО». Докладне дослідження структури змішаного типу, названої далі квазімістковою, наводиться нижче.

Докладний розгляд базових двоканальних відмовобезпечних структур, що відповідають всім вимогам функціональної безпеки КС [85], наведений у (Додатку В, п. В.6.1-В.6.3). Проаналізовано особливості застосування та приведено основні

переваги і недоліки дубльованих систем: зі слабкими зв'язками, з сильними зв'язками, з сильними зв'язками і зовнішнім тестуванням.

2.2.2 Дубльована система з перевіркою

Дубльована система з перевіркою (рис. 2.2) складається із двох каналів, побудованих у вигляді переверяючих пристроїв.

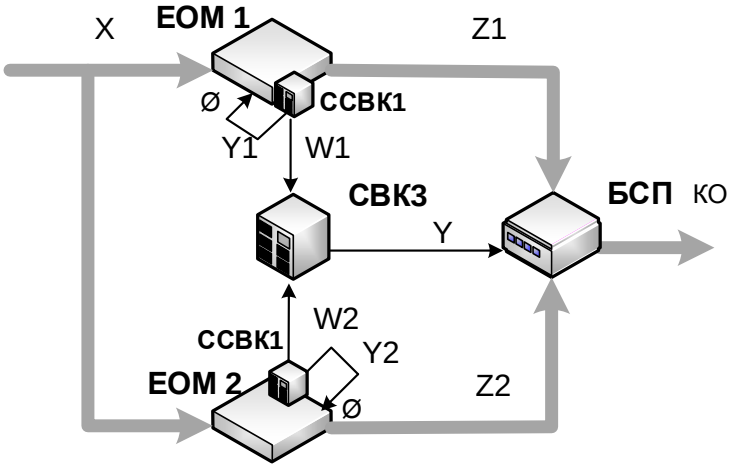


Рисунок 2.2 – Дубльована система з перевіркою

Кожен обчислювальний канал забезпечується схемою внутрішнього контролю (СВК), завданням якої є виявлення несправностей заданого класу в обчислювальному каналі і власних несправностей.

Схеми внутрішнього контролю кожного каналу при виявленні помилки випрацьовують сигнал Y, який відключає відповідний обчислювальний канал.

Вихідні сигнали Z1 і Z2 порівнюються безпечною схемою порівняння (БСП). При збіганні сигналів формується керуючий вплив на керований об’єкт (КО).

Сигнали контролю W1 і W2, які формуються за допомогою СВК1 і СВК2, порівнюються в СВК3. При виявленні помилки у СВК3 випрацьовується сигнал Y, який переводить БСП у захисний стан. Контроль каналів може бути апаратний і

програмний. Можливе використання незалежних (диверситетних) програм у кожному процесорі.

Перевагами системи є висока глибина контролю обчислювальних каналів, висока безпека, здатність виділення обчислювального каналу, що відмовив.

Недоліками системи *є* неможливість виявлення помилок у програмному забезпеченні при використанні однакових програм у кожному з каналів; складність реалізації системи при використанні диверситетних обчислювальних каналів; невисока експлуатаційна готовність, адже будь-яка відмова переводить систему у неробочий захисний стан.

Загальним недоліком представлених дубльованих структур, які мають вихідну схему з логічною функцією «І» (БСП), є невисока експлуатаційна готовність, адже будь-яка відмова переводить структуру в неробочий захисний стан. Ця вимога є особливо важливою для КС з неперервним циклом роботи, які забезпечують безпеку людей, навколишнього середовища та технічних ресурсів. При цьому допускається припинення функціонування системи на обмежений проміжок часу, необхідний для участі оператора в усуненні відмови та перезапуску системи.

Для відмовостійких систем із високою експлуатаційною готовністю реалізується так званий режим Non Stop, який передбачає «гарячу» заміну в автоматичному режимі складових частин структури КС, що відмовили, на справну. При цьому вихідна схема таких дубльованих структур повинна виконувати логічну функцію «АБО». Тому такий загальний недолік у вигляді низької експлуатаційної готовності, властивий усім наведеним схемам дублювання на рівні системи з вихідною функцією відновлюючого органу (ВО) у вигляді логічного «І» , в відмовостійких КС відсутній.

Таким чином, найбільш доцільним є структура зі змішаними властивостями, переваги якої притаманні як відмовостійким, так і відмовобезпечним структурам. Для реалізації такої структури необхідна розробка спеціальної схеми контролю і реконфігурації (СР) (включаючи і функцію ВО) зі змінною логічною функцією І/АБО (див. п. 2.4).

2.3 Вимоги до програмного забезпечення відмовостійких КС

2.3.1 Структура программного забезпечення

При проектуванні високонадійних відмовостійких і безпечних КС програмні засоби мають визначальний вклад у реалізацію системою необхідних функцій. Створення безпечних систем, логіка функціонування яких відображена у вигляді програми, охоплює два аспекти: безпеку програмного забезпечення (ПЗ), безпеку системи, що гарантується засобами програмного забезпечення. Програмне забезпечення КС складається із двох великих блоків: системного і прикладного. Ядром системного ПЗ є спеціалізована операційна система (ОС). Функції ОС не залежать від безпосередніх завдань системи і полягають у виділенні ресурсів процесора для вирішення різних функціональних завдань. ОС визначає почерговість виконання обчислювальних процесів, обслуговування та управління периферійними пристроями, призначення переривань, управління видачею синхронізуючих сигналів.

Прикладне ПЗ реалізує всі основні функції КС. Пакети прикладних програм умовно поділяються на кілька типових програм, вирішуючих основні функції КС і функції взаємодії з оператором (персоналом користувачів) і обладнанням. Не всі програми в однаковій мірі відповідають за надійність і безпеку, тому і методи забезпечення цих властивостей для кожного програмного модуля можуть бути різні.

2.3.2 Основні принципи забезпечення надійності та безпеки програмного забезпечення

Однією із причин порушення працездатності ПЗ є відхилення вихідного тексту програми від еталону, який повністю реалізує вимоги замовника. Помилки такого роду у практиці програмування отримали назву помилок програмування. Помилки другого роду визначаються насамперед відмовами і збоями апаратних засобів. Через високий ступінь інтеграції апаратно-програмних засобів більшість відмов і збоїв

апаратури (регістрів, пристроїв пам'яті, інформаційних магістралей) призводять до спотворення команд програми і/або використовуваних даних.

Принципи і методи забезпечення надійності та безпеки ПЗ відповідно до їх мети можливо розбити на три групи (табл. 2.1). У процесі експлуатації надійність і безпека ПЗ забезпечуються введенням надмірності, яка може бути структурною, інформаційною та часовою.

Таблиця 2.1 – Методи забезпечення надійності та безпеки ПЗ

Попередження помилок	Виявлення помилок	Виправлення помилок
1. Спеціальна організація праці групи програмістів. 2. Методи системного аналізу коду. 3. Методи структурного проектування. 4. Автоматизація проектування	1. Верифікація. 2. Тестування. 3. Програми, що самоперевіряються. 4. N-версійне програмування	1. Відмовостійке кодування інформації. 2. Захищене програмування. 3. Локалізація відмов. 4. Безпечна поведінка при відмовах

Попередження помилок – найбільш ефективний шлях забезпечення надійності, адже помилку легше попередити, ніж потім виявити її і виправити. Методи попередження помилок в основному застосовуються на етапі проектування.

Для попередження помилок використовують раціональну організацію праці програмістів, методи системного аналізу, методи структурного проектування і автоматизації проектування [86].

Ці методи дозволяють систематизувати і спростити процеси проектування ПЗ, зробити реальною задачу написання коректних програм із малою кількістю помилок. Розглянемо інші методи забезпечення надійності та безпеки ПЗ більш докладно.

Виявлення програмних помилок

Заходи щодо виявлення помилок можна розбити на дві групи: пасивні методи

виявлення помилок у процесі нормальної роботи ПЗ та активні методи перевірки ПЗ з пошуку помилок.

Пасивні методи можуть бути прийняті на різних структурних рівнях ПЗ при передачі управління від одного програмного модуля іншому. Пасивні методи можуть виявити помилку тільки в тому випадку, якщо вона спотворила дані способом, заздалегідь передбаченим у засобах перевірки.

Основним активним методом виявлення помилок програмування є їх тестування, в основі якого лежить той факт, що програма будь-якої складності при строго фіксованих вихідних даних і абсолютно надійній апаратурі виконується однозначно певним алгоритмом. Виконання всіх маршрутів програм є складним комбінаторним завданням [87, 88].

Метою тестування є виявлення відмов програмно-апаратних засобів для запобігання їх впливу на виконання основного алгоритму функціонування КС. У структурованій програмі виділяють тестування модулів, сполучень між модулями, зовнішніх функцій і комплексне тестування. При складанні тестів використовуються два підходи: функціональний і структурний. У першому випадку внутрішня структура програми не враховується. Структурні тести будуються з використанням інформації про внутрішню структуру програми. Процес контролю методом тестування передбачає почергове виконання тестових і програмних процедур. При цьому їх взаємне чергування може бути довільним і визначатися обсягом тесту.

Недоліки тестування: не виявляються апаратні збої, під час тестування стан об'єкта управління не контролюється. Тому тестування використовується як додатковий засіб контролю спільно з іншими методами.

Виявлення відмов і збоїв апаратних засобів

Ступінь безпеки при відмовах і збоях апаратних засобів визначається можливістю засобів контролю адекватно оцінювати стан технічних засобів у заданий проміжок часу. Як засіб контролю необхідно застосовувати як апаратні, так і ПЗ. Коли програмні процедури контролю виконуються на одних і тих же технічних засобах, що і основна програма, це ставить під сумнів результати їх роботи, тому що

помилки, які спотворюють основний алгоритм, можуть спотворювати і алгоритм контрольної програми.

Тому програмні методи контролю найчастіше доповнюються апаратними засобами контролю і орієнтуються на перевірку результатів обчислень. Найбільш часто використовуваними методами програмного виявлення відмов і збоїв апаратних засобів є створення програм, що самоперевіряютьсяі *n*-версійного програмування.

Програми, що самоперевіряються

Визначення 2.12. Якщо для будь-якого входу, який задовольняє вхідний специфікації, програма видає правильний вихідній результат або випрацьовує попередження, яке інформує користувача, що вихід може бути неправильним, ця програма буде такою, що самоперевіряється.

Визначення 2.13. Керуюча програма називається захищеною програмою, якщо при виникнені будь-якої помилки заданого класу на будь-якій робочій послідовності вхідних даних, вихідні дані обчислюються правильно чи є захисними.

Визначення 2.14. Керуюча програма називається програмою, що самотестується, якщо для кожної помилки заданого класу існує хоча б одна робоча послідовність вхідних даних, на якій обчислюється хоча б одне захисне значення вихідних даних.

Таким чином, керуюча програма буде такою, що самоперевіряється, якщо вона захищена від помилок і є самотестованою. Захищеність від помилок виключає неправильні дії з боку системи програм на керовані об'єкти. Самотестованість виключає наявність невиявлених помилок і їх накопичення з часом. Ці дві властивості є основними вимогами до безпечних систем.

Метод побудови програм, що самоперевіряються базується на засадах синтезу кінцевих автоматів, що самоперевіряються. Для заданого алгоритму управління знаходять функціональний опис, який виконує цей алгоритм автомата [89]. Програма, що самоперевіряється являє собою послідовність програмних модулів, одні з яких виконують алгоритм управління, а інші – контролюють правильність

цього обчислення. Результати обчислень кожного модуля аналізуються в контрольних точках програми.

Достовірність контролю залежить від ймовірності того, що спотворення результату на виході модуля виявляється за допомогою виводу, якому має задовольняти стан розрахунку програми в даній контрольній точці. Підвищити достовірність контролю можливо двома способами. Перший спосіб полягає в зменшенні періоду контролю модуля.

Примітка 2.3. При зменшені розмірів модуля (це підтверджує переваги квазімісткової структури (див. п. 2.4)) зменшується час виконання програми контролю модуля, поліпшуються показники надійності, але зростають обсяги програм.

Другий спосіб полягає в такому виборі висновків контролю (тверджень) у програмі і в такому їх розміщенні, що виключає (при заданих обмеженнях) помилковий висновок про правильність результатів обчислень.

N-версійне програмування

Метою *N*-версійного програмування є виявлення решти помилок проектування ПЗ та відмов апаратних засобів із метою запобігання появи небезпечних відмов.

N-версійність програмування передбачає *n*-разову реалізацію даної програми різними способами. Ефективність даного методу визначається насамперед ступенем несхожості програмних компонент (рівнем діверситету), який зводить до мінімуму появу однакової реакції при порушенні роботи технічних засобів або наявності програмних помилок.

Фізична різноманітність (діверситет) програм може бути досягнута:

• створенням версій програми різними програмістами, колективами програмістів або використанням спрощеної моделі програми як іншої версії;

• використанням різних методів логічної організації програм;

• використанням різних версій мов або різних версій компіляторів з однієї і тієї ж мови.

Результати роботи різних версій програм порівнюються. При розходженні результатів фіксується помилка. Порівняння може бути організовано апаратно або програмно.

Виправлення помилок і стійкість до помилок

Під виправленням помилок у ПЗ розуміється усунення шкоди, завданої помилкою, а не тільки виправлення самої помилки. Це пов'язано з тим, що намагатися виправити помилку у програмному забезпеченні без участі людини неможливо. Найбільше, що можна зробити в цьому випадку, забезпечити стійкість ПЗ до помилок і визначити безпечну поведінку при відмовах і збоях технічних засобів для того, щоб звести нанесений помилкою збиток до мінімуму.

Основними методами виправлення помилок і забезпечення стійкості до помилок є використання відмовостійкого кодування інформації, захищене програмування, локалізація відмов у рамках деякої частини ПЗ, безпечна поведінка при відмовах.

2.4 Квазімісткова структура з реконфігурацією

2.4.1 Опис та аналіз вихідної функції КМС

З метою підвищення відмовостійкості і експлуатаційної готовності дубльованої системи з перевіркою (рис. 2.2) був розроблений новий клас дубльованої системи із квазімістковою структурою (далі КМС) [7, 17].

Такі позитивні якості досягаються декомпозицією (дихотомією – послідовним розподілом цілого на дві частини, потім кожної з них знову на дві частини і т.д.), при якій кожен обчислювальний канал (ЕОМ) розбивається на *n* рівнонадійних елементів структури (функціональних субблоків ФСБ), які за допомогою схем реконфігурації (СР), що мають логічну функцію «І/АБО», утворюють n дубльованих рівнонадійних вузлів. Аналіз працездатності каналів здійснюється парою ССВК, а

вихідний контроль працездатності всієї структури здійснюється БСП також з логічною функцією «І/АБО» [6].

Визначення 2.15. Квазімістковою структурою називається двоканальна відмовостійка структура з реконфігурацією, основний обчислювальний ресурс якої розподілений між самоконтролюючими дубльованими вузлами рівної надійності.

Примітка 2.4. Розбиття обчислювального каналу на рівнонадійні або приблизно рівнонадійні ФСБ призводить до найбільшого ефекту – зростання ймовірності безвідмовної роботи і експлуатаційної готовності системи.

Схема декомпонованої структури, що складається із двох вузлів, наведена на рис. 2.3. Візуально така структура нагадує місткову структуру, в якій замість центрального типового елемента структури встановлені дві СР (по одній у кожний канал), які забезпечують перехресні зв'язки між каналами з метою реконфігурації структури в разі виходу з ладу відповідного каналу.

У нормальному режимі пара СР реалізує логічну функцію «І» (здійснюється безперервний контроль синхронності роботи каналів), у випадку відмови одного з ФСБ каналу (поява сигналу від апаратних І/АБО програмних засобів внутрішнього контролю ССВК), СР змінює свою логічну функцію на «АБО» та здійснює безперешкодне проходження інформації з виходу справного ФСБ вузла до наступного вузла, розпаралелюючи її на два канали. У такому стані система знаходиться до моменту відновлення працездатності ФСБ, що відмовив, або в автоматичному режимі (за рахунок самодіагностики і самовідновлення), або в результаті здійснення режиму «гарячої» заміни з боку оператора. Для досягнення відмовостійкості системи в цілому забезпечується функціональна автономність і незалежність кожного ФСБ від інших компонентів системи, щоб при виході з ладу будь-якого ФСБ останній не чинив негативного впливу на роботу інших ФБ і всієї системи в цілому.

Примітка 2.5. Якщо ЕОМ розбивається на умовно рівнонадійні ФСБ (наприклад, ЕОМ1.1 і ЕОМ1.2, ЕОМ2.1 і ЕОМ2.2), то середнє напрацювання до відмови такого ФСБ може бути орієнтовно оцінено за формулою [90] $T_{ФСБ} = \sqrt{n} \cdot T_{ЕОМ}$.

Схема декомпонованої структури, що складається із двох вузлів, наведена на рис. 2.3.

Запишемо логічну функцію дубльованої структури, зображеної на рис. 2.2.

$$F_{Ä} = z_1 \cdot z_2. \tag{2.5}$$

Провівши аналогію між двома структурами (рис. 2.2 і 2.3), можна записати

$$z_1 = z_{1.1} \cdot z_{1.2} \text{ та } z_2 = z_{2.1} \cdot z_{2.2}. \tag{2.6}$$

$$F_{Ä} = z_1 \cdot z_2 = z_{1.1} \cdot z_{1.2} \cdot z_{2.1} \cdot z_{2.2}. \tag{2.7}$$

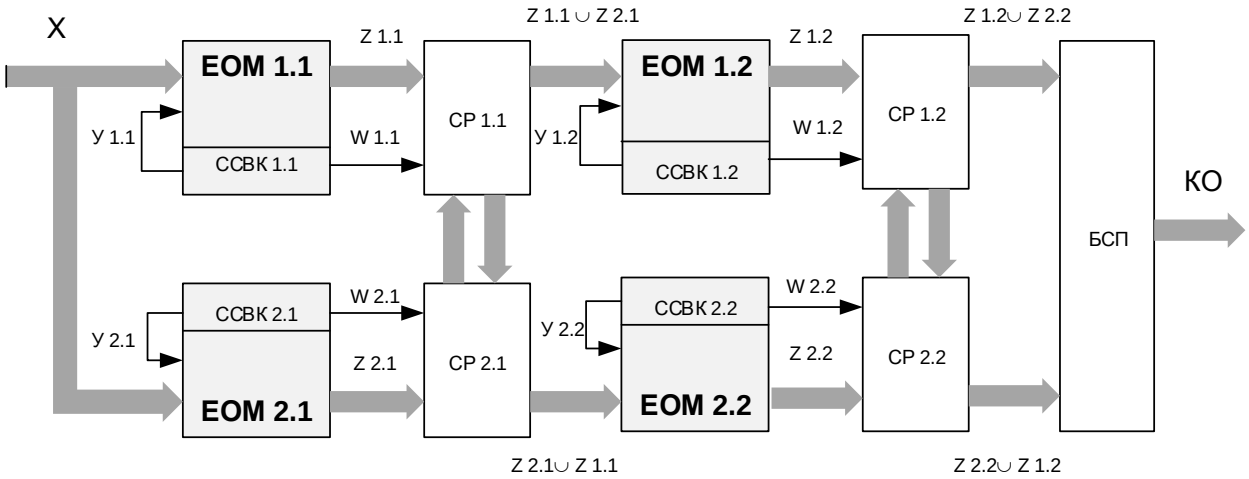


Рисунок 2.3 – Квазімісткова структура

Запишемо логічні функції вузлів для квазімісткової структури (рис. 2.3).

$$f_{1.1} = z_{1.1} \cup z_{2.1}; \; f_{1.2} = z_{1.2} \cup z_{2.2},$$
$$f_{2.1} = z_{2.1} \cup z_{1.1}; \; f_{2.2} = z_{2.2} \cup z_{1.2}. \tag{2.8}$$

Запишемо логічну функцію квазімісткової структури через логічні функції вузлів:

$$F_{\hat{E}\hat{I}\ \tilde{N}} = (f_{1.1} \cdot f_{1.2}) \cdot (f_{2.1} \cdot f_{2.2}) = \left[(z_{1.1} \cup z_{2.1})(z_{1.2} \cup z_{2.2})\right] \cdot \left[(z_{2.1} \cup z_{1.1})(z_{2.2} \cup z_{1.2})\right]. \quad (2.9)$$

З урахуванням (2.6) і беручи до уваги (2.7), отримаємо

$$F_{KMC} = z_1 \cup z_2 \cup z_1 \cdot z_2 \cup z_1 \cdot z_{1.2} \cdot z_{2.1} \cup z_1 \cdot z_{1.1} \cdot z_{2.2} \cup z_2 \cdot z_{1.1} \cdot z_{2.2} \cup$$
$$\cup z_2 \cdot z_{1.2} \cdot z_{2.1} \cup z_{1.1} \cdot z_{2.2} \cup z_{1.2} \cdot z_{2.1}. \quad (2.10)$$

Розглянувши (2.10), не важко побачити, що квазімісткова структура характеризується більш високим рівнем відмовостійкості і, як наслідок, експлуатаційної готовності, так як має значно більшу кількість працездатних станів, ніж проста дубльована структура. Наявність працездатних станів на наборах $z_1 \cup z_2$ свідчить про те, що квазімісткова структура, зображена на рис. 2.3, здатна до автоматичної реконфігурації в одноканальну структуру без додаткового втручання і зміни функції ВО.

Перевагою КМС є те, що з ростом кількості вузлів зростає експлуатаційна готовність системи; зменшується складність ФСБ, з яких складається вузол, що спрощує програмну І/АБО технічну реалізацію ССВК, підвищує точність контролю і діагностики несправностей структури, що, як наслідок, призводить до зменшення часу відновлення та зростання показників надійності відновлювальної квазімісткової структури в цілому. Виявлений позитивний ефект від розбиття системи на рівнонадійні дубльовані вузли та використання реконфігурації структури в разі відмови ФСБ дозволяє більш ефективно здійснювати структурний синтез високонадійних відмовостійких і безпечних комп'ютерів і КС.

2.4.2 Структурна схема надійності КМС

Структурна схема надійності (ССН) КМС проілюстрована за допомогою блок-схеми (рис. 2.4).

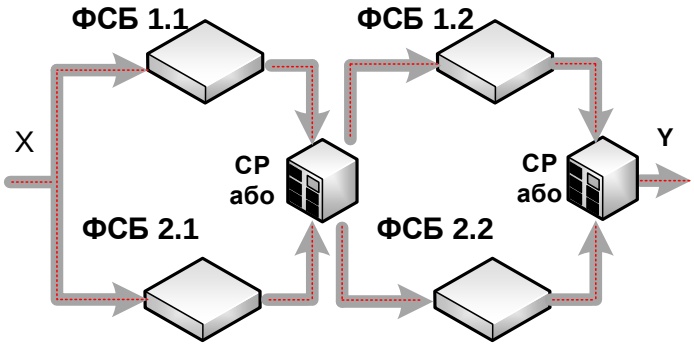


Рисунок 2.4 – Структурна схема надійності КМС за відсутності несправностей

Примітка 2.6. Функція «І» у змінній функції СР «І/АБО» впливає виключно на достовірність роботи КМС, а безвідмовність структури визначає функція «АБО» СР, це і визначає вид ССН.

Для реалізації КМС пропонується застосовувати дублювання найвідповідальніших функціональних блоків системи.

Конкретний вибір компонентів для дублювання здійснюється проектувальником для конкретної апаратної реалізації системи, стійкої до відмов ФСБ. Для досягнення відмовостійкості системи в цілому необхідна функціональна автономність і незалежність кожного ФСБ від інших компонентів системи, щоб при виході з ладу будь-якого елемента в середині ФСБ, останній не чинив негативного впливу на роботу інших ФСБ і всієї системи в цілому.

КМС залишається працездатною при виході з ладу одного з чотирьох ФСБ або двох, підключених послідовно або перехресно.

Тільки одночасний вихід із ладу ФСБ в одному вузлі КМС призводить до втрати її працездатності та переходу в захисний стан.

2.4.3 Приклад апаратної реалізації КМС

Апаратно, принцип побудови системи полягає в організації навколо кожного виходу ФСБ схеми реконфігурації (СР), яка містить у собі тестовий модуль (ТМ)

виявлення несправностей та генерації керуючих сигналів і так само реконфігуратора (РК), який відповідає за участь ФСБ в обчислювальному процесі того чи іншого каналу (рис. 2.5).

Коли у ФСБ відбувається обробка вхідних впливів на систему X1, X2, X3, правильність функціонування ФСБ перевіряється схемою контролю (СК) (СК може бути побудована на високочастотному ПЛІС [5]), яка через мультиплексор (MS) (також можливе виконання схеми на компараторі) формує керуючий сигнал для реконфігуратора (РК).

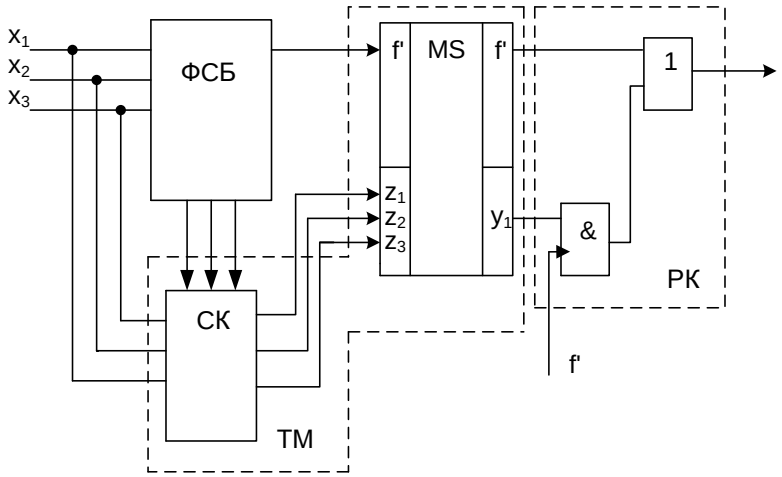


Рисунок 2.5 – Апаратна реалізація схеми реконфігурації з функцією «І/АБО»

Залежно від виду такого сигналу 0/1, РК пропускає сигнал далі або блокує його, одночасно приймаючи сигнал з іншого справного ФСБ.

У загальному вигляді апаратна реалізація двоканальної структури з реконфігурацією виглядає таким чином (рис. 2.6).

Декомпозиція ФБ в КМС може здійснюватися за таким прикладом. Для цього повинна існувати можливість його поділу за принципом декомпозиції на приблизно рівнонадійні (дихотомії) функціональні субблоки (ФСБ). Необхідно, щоб кожен такий ФСБ мав функціональну автономність і незалежність від інших ФСБ, щоб при виході з ладу будь-якого ФСБ останній не чинив негативного впливу на роботу інших ФСБ (тобто, відмови ФСБ повинні бути взаємонезалежними). Наприклад,

процесор з його оточенням, відео карта, звукова карта, мережева карта, порти введення-виведення, постійний запам’ятовуючий пристрій, дискові накопичувачі, джерело живлення, пристрої охолоджування та ін; при цьому, наприклад, відмова відеокарти не повинна приводити до відмови звукової карти).

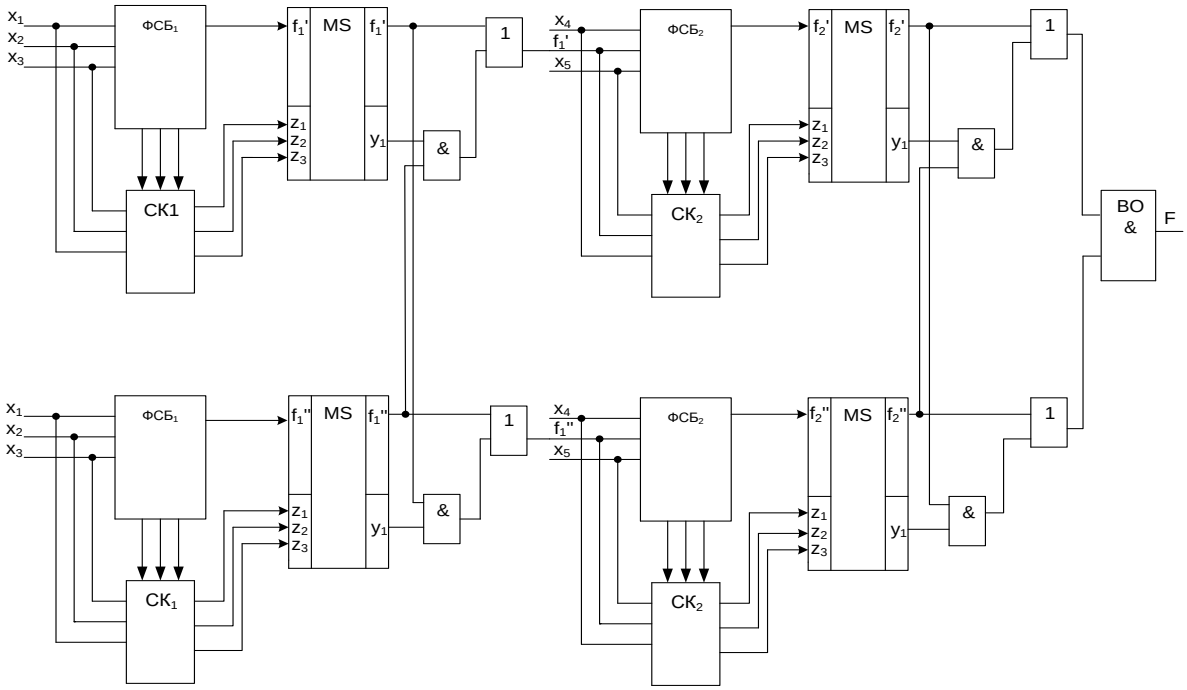


Рисунок 2.6 – Приклад апаратної реалізації КМС

Для підвищення надійності і відмовостійкості ЕОМ необхідно сгрупувати її складові частини таким чином, щоб вийшло якомога більше ФСБ з приблизно рівною надійністю (показники надійності складових частин обираються з відповідних довідників), наприклад, ФСБ1 (процесор з його оточенням), ФСБ2 (відеокарта, звукова карта), ФСБ3 (мережева карта, порти введення-виведення), ФСБ4 (постійний запам’ятовуючий пристрій, пристрої охолоджування), ФСБ5 (дискові накопичувачі), ФСБ6 (джерело живлення). Це найбільш простий приклад декомпозиції персональної обчислювальної машини на ФСБ, що ілюструє використання дубльованої КМС, розбиття складної КС на ФСБ стало складною оптимізаційною задачою.

Найбільш ефективно і точно реалізацію КМС можна здійснити з використанням однакових програмованих мікроконтролерів, які виконують функції

так званих "ядер". На основі дубльованих вузлів із використанням програмованих мікроконтролерів можна будувати КМС із мікроконвеєрною обробкою даних, де результати обробки даних попереднього мікроконтролера є вхідними даними для наступного.

2.4.4 Квазімісткова структура кластерного типу

Запропонована квазімісткова система є зручним вирішенням проблеми підвищення живучості КС, оскільки відомі в теорії живучості систем [91] способи забезпечення даної властивості реалізуються на різних ієрархічних рівнях: елементному, підсистемному або системному. У цьому сенсі квазімісткова структура дозволяє реалізовувати топологічну оптимізацію апаратної частини КС.

Визначення 2.16. Топологічною оптимізацією КС називається зміна структури апаратних та програмних ресурсів із метою організації найбільш оптимальної їх конфігурації.

У [92] сформульовані основні принципи і способи забезпечення живучості КС та вимоги, а саме:

- елементи КС повинні мати малу структурну значимість і високу стійкість;
- структура КС повинна забезпечувати, по можливості, більше чи достатнє (в задачах оптимізації) число станів працездатності;
- стани працездатності КС повинні забезпечуватися якомога меншим числом елементів;
- різні стани працездатності КС повинні забезпечуватися різними елементами;

Кількісна оцінка жівучості складної технічної системи, як правило, виконується на основі конкретних метрик, що характеризують втрату функціональності (функціональну деградацію) за певний проміжок часу.

Принцип інфраструктурного резервування

Застосовуємо сформульований у роботі [3] принцип інфраструктурного резервування і диверсності для забезпечення безпеки і живучості КС.

Визначення 2.17. Під інфраструктурним резервуванням розуміється надмірність, реалізована на інфраструктурному рівні з метою підвищення безпеки і живучості КС.

Кардинальне вирішення в напрямі підвищення живучості досягається шляхом реалізації принципу інфраструктурного резервування і діверсності за допомогою інфраструктурної декомпозиції КС на автономні кластери, що представляють собою функціонально відокремлені підсистеми.

Як приклад аналізу живучості та реалізації принципу інфраструктурного й функціонального резервування наведемо [3] квазімісткову структуру відмовостійкого ядра системи протиаварійної автоматики (СПА) гідроелектростанцій (ГЕС) [25], яка декомпонована на 7 кластерів (рис. 2.7).

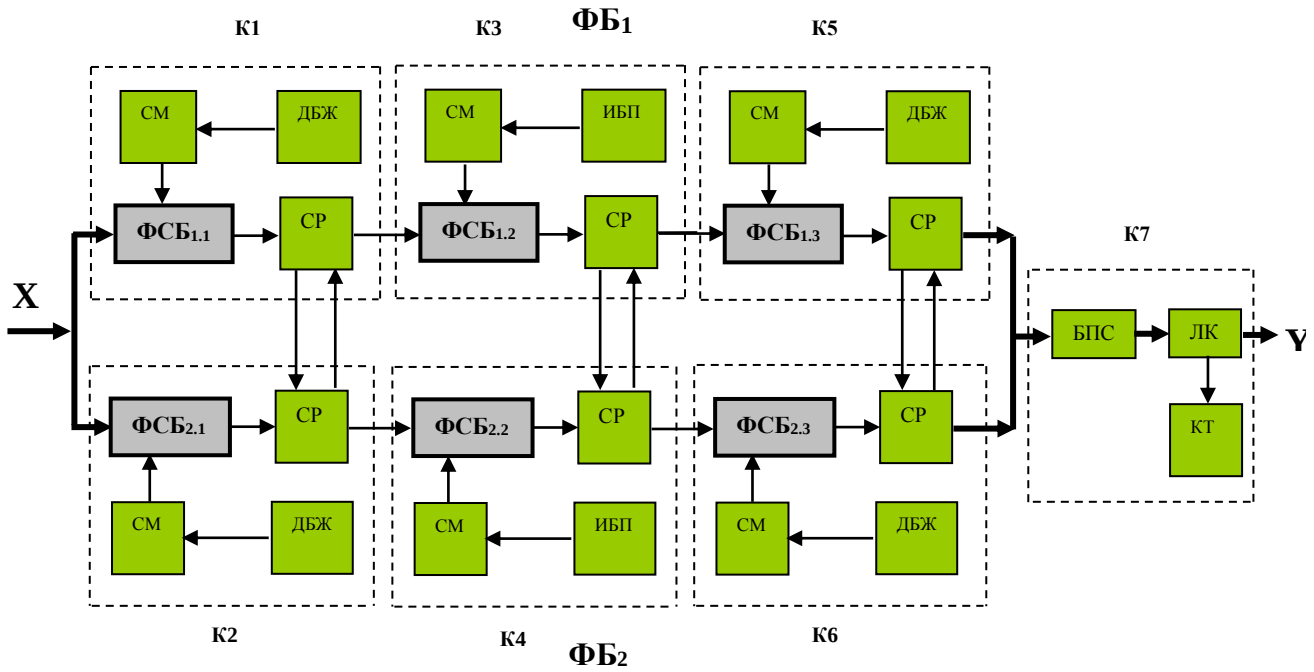


Рисунок 2.7 – Інфраструктурна схема СПА підвищеної живучості на базі КМС

З метою підвищення відмовостійкості і живучості СПА для її реалізації пропонується використання описаної в п. 2.4 КМС, що за своєю топологічною гнучкістю дозволяє сформувати кластерну структуру.

На рис. 2.8 зображено кластерну структуру, реалізовану на базі КМС.

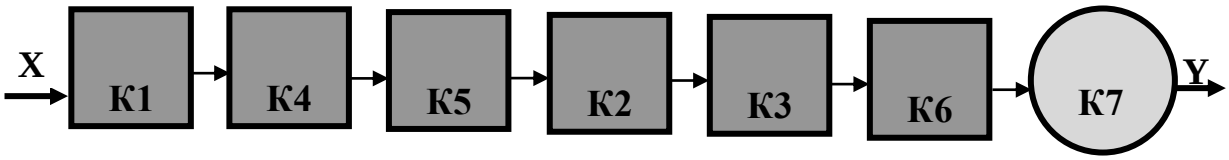


Рисунок 2.8 – Спеціальний порядок розташування кластерів у структурі СПА підвищеної живучості

Кожен типовий кластер К1-К6 містить відповідний ФСБ СПА зі своєю ССВК, схему реконфігурації (СР), системний монітор (СМ) і джерело безперебійного живлення (ДБЖ) системного монітора.

Загальне резервне електропостачання кластерів здійснюється від систем безперебійного живлення (СБЖ) [94], призначених для електроживлення всієї АСУ ТП ГЕС, включаючи центральний пульт управління та контролю і механізми управління аварійними заслінками гідроагрегатів.

Режимний кластер К7, який виконує найбільш відповідальні операції щодо безпосереднього управління об'єктами керування, має обмежений доступ обслуговуючого персоналу ГЕС. Він містить блок безпечних пристроїв сполучення, логічний комутатор і контрольне табло, призначене для оперативного контролю за станом СПА в цілому. Логічний комутатор виконаний на *h1*-надійних електромагнітних реле з високим рівнем гарантування [95]. Кожен кластер СПА конструктивно являє собою відсік із міцним герметизованим входом, стійкий до затоплення водою або зовнішнього впливу вибухових речовин.

У зображеній на рис. 2.8 структурі важливим є порядок розташування кластерів (метод топологічної оптимізації), що впливає на кількість працездатних станів СПА в результаті несприятливих впливів (НВ).

Визначення 2.18. Під топологічною оптимізацією квазімісткової структури СПА розуміється вибір послідовності розміщення кластерів КМС на топології розміщення технічних приміщень гідроелектростанції з метою забезпечення найвищої стійкості СПА до НВ.

Така інфраструктурна диверсність дозволяє знизити ризики численних аварій, оскільки знижується безліч загальних вразливостей системи в цілому. Кожен типовий кластер СПА, як правило, являє собою функціонально відокремлену підсистему, технічно виконану у вигляді набору типових елементів заміни, які забезпечують високу ремонтопридатність СПА в цілому.

У середині кластерного відсіку розташовано робоче місце оператора системного монітора (СМ), який призначений для контролю працездатності, технічної діагностики, технічного обслуговування і ремонту обладнання кластера СПА ГЕС.

На відміну від кластерів К1-К6 (рис. 2.8), виконаних на елементах із симетричними відмовами (ПЛІС, мікропроцесорах, мікросхемах, напівпровідникових приладах і т.п.), кластер К7 виконаний на *h1*-надійних елементах гравітаційної автоматики з виключенням небезпечних відмов і не вимагає додаткового резервування [96]. Проведемо аналіз потенційних вразливостей кластерної структури СПА.

При проектуванні кластерів розглядалися такі види НВ: затоплення кластера (під час аварії при незачинених вхідних дверях), вибух у середині кластера, вибух у середині кластера і часткове пошкодження одного сусіднього кластера, вибух у середині кластера і часткове пошкодження двох сусідніх кластерів.

Затоплення кластера може статися при руйнуванні плотини в результаті землетрусу, при різкому підвищенні рівня нижнього б'єфу (в результаті сильного паводку або аварії на верхній або нижній плотині каскаду ГЕС), у результаті техногенної аварії в машинному залі ГЕС.

Вибух у кластері може статися через умисний терористичний акт, скоєний оператором СМ або іншою особою за участю оператора в організації теракту. Під час вибуху в середині кластерів К1-К6 кластер повністю виходить із ладу, а при сильному вибуху в середині кластера можуть бути додатково пошкоджені один або два сусідніх кластери.

Перелік працездатних станів СПА при пошкодженнях кластерів наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Працездатні стани СПА при пошкодженнях кластерів

№ п/п	Вид пошкодження кластерів (часткове пошкодження - ЧП)	Стан СПА (роботоздатний – Р, нероботоздатний – НР, частково роботоздатний - ЧР)
1	Затоплення К1	Р
2	Затоплення К2	Р
3	Затоплення К3	Р
4	Затоплення К4	Р
5	Затоплення К5	Р
6	Затоплення К6	Р
7	Затоплення К7	ЧР (захисний)
8	Вибух К1, ЧП К4	Р
9	Вибух К4, ЧП К5	Р
10	Вибух К5, ЧП К2	Р
11	Вибух К2, ЧП К3	Р
12	Вибух К3, ЧП К6	Р
13	Вибух К6 ЧП К7	Р
14	Вибух К7	ЧР (захисний)
15	Вибух К4, ЧП К1 і К5	Р
16	Вибух К5, ЧП К4 і К2	Р
17	Вибух К2, ЧП К5 і К3	Р
18	Вибух К3, ЧП К2 і К6	Р
19	Вибух К6 ЧП К3 і К7	Р
20	Вибух К7 ЧП К6	ЧР (захисний)

При впливі всіх перерахованих НВ СПА повинна зберігати повну або часткову працездатність зі збереженням функціональної безпеки ГЕС, що забезпечується відмовостійкою структурою ядра СПА та спеціальним порядком розташування кластерів у приміщенні ГЕС.

Аналіз результатів, наведених у табл. 2.2, показує високий рівень живучості СПА, побудованої за кластерною структурою на базі КМС. Спеціальне розташування кластерів (рис. 2.8) дозволяє зберігати працездатний стан СПА навіть при виході з ладу в результаті вибуху 3-х кластерів одночасно.

Частково працездатний стан СПА (захисний) через пошкодження кластера К7, що виключає при цьому небезпечну відмову системи, забезпечується побудовою цього кластера на *h1*-надійних елементах гравітаційної автоматики - електромагнітних реле з високим рівнем гарантії в герметичних протиударних захисних кожухах.

2.5 Висновки до розділу 2

1. Дослідження властивостей відмовостійких систем вперше дозволило використовувати стратегію відмовобезпеки як альтернативу дорогої стратегії повної відмовостійкості при проектуванні гарантоздатних КС. Було удосконалено та доповнено класифікацію відмовобезпечних структур КС.

2. З метою підвищення безвідмовності і експлуатаційної готовності дубльованої структури запропоновано новий клас двоканальних КС із квазімістковою структурою (КМС) та можливістю її реконфігурації при відмовах складових частин.

3. Сформульовано вимоги до програмного забезпечення відмовостійких КС та доведено можливість досягнення високого ступеня захищеності керуючих програм завдяки використанню методів попередження, виявлення та забезпечення стійкості до помилок.

4. Доведено, що на базі КМС, завдяки декомпозиції функціональних блоків на рівнонадійні частини (ФСБ) та додавання схем реконфігурації можна досягти підвищення загального рівня ймовірності безвідмовної роботи.

5. На основі КМС розроблено спеціальну кластерну структуру, що дозволяє значно підвищити живучість КС, що демонструється на прикладі СПА ГЕС.

6. Продемонстровано, що принцип дихотомії, покладений в основу розробки КМС, легко масштабується під різні умови і має високий потенціал застосування при побудові безвідмовних і відмовостійких систем підвищеної безвідмовності, готовності і безпеки.

Основні результати розділу опубліковані автором у роботах [3, 7, 17–19].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

3.1 Дослідження надійності КМС

3.1.1 Порівняльна оцінка надійності КМС з класичною дубльованою структурою стандартизованим методом

Першочергово, для оцінки безвідмовності запропонованої КМС проведемо її порівняння зі своїм прототипом – дубльованою структурою, що складається з двох обчислювальних каналів (умовно ЕОМ або ФБ), до складу якої входить схема внутрішнього контролю (ССВК), завданням якої є виявлення несправностей заданого класу в обчислювальному каналі і власних несправностей.

Розглянемо класичну дубльовану структуру (ДС) з абсолютно надійним ВО з функцією АБО (рис. 3.1).

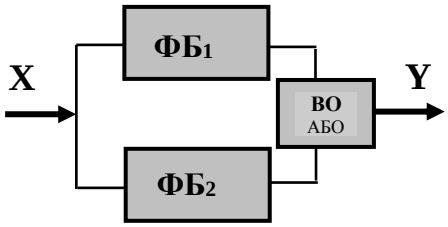


Рисунок 3.1 – Дубльована структура

Ймовірність безвідмовної роботи структури стандартизованим методом обчислюється таким чином. Для умови $R_{ФБ} = 0{,}9$ маємо $R_{ДС} = 2R_{ФБ} - R_{ФБ}^2 = 0{,}99$.

Побудуємо мінімальну двовузлову КМС (рис. 2.7). Розіб'ємо ФБ на два функціонально відокремлених субблоки (ФСБ) з умовно однаковою надійністю, тобто, $R_{ФСБ1} = R_{ФСБ2} = R_{ФСБ} = 0{,}95$. При цьому $R_{ФБ} = R_{ФСБ1} \cdot R_{ФСБ2} = R_{ФСБ}^2 \approx 0{,}9$.

Визначення 3.1. Функціонально відокремленим субблоком називається блок, який виконує певну функцію (функції, процеси) в кінцевому (завершеному) вигляді.

ССН пропонованої КМС представляє собою два дубльованих вузла (ФСБ1.1-ФСБ2.1) та (ФСБ1.2-ФСБ2.2), які підключені послідовно. Так як за умовою завдання надійність ФСБ1.1=ФСБ2.1=ФСБ1.2=ФСБ2.2=ФСБ, ймовірність безвідмовної роботи дубльованого вузла обчислюється таким чином: $R_{ДВ} = 2R_{ФСБ} - R_{ФСБ}^2 = 0{,}998$.

Так як обидва вузла з'єднані послідовно, в сенсі надійності, то ймовірність безвідмовної роботи двовузлової структури КМС у цілому буде дорівнювати $R_{КМС} = R_{ДВ} \cdot R_{ДВ} = R_{ДВ}^2 = 0{,}996$.

Підсумки дослідження

1. Не важко бачити, що запропонована КМС з реконфігурацією тільки за рахунок розбиття на два рівнонадійних дубльованих вузла проти класичної дубльованої структури дає виграш у плані ймовірності безвідмовної роботи (0,996 проти 0,99), а також можливо вважати, що вона має переваги у плані готовності, оскільки коефіцієнт оперативної готовності знаходиться у прямій залежності від ймовірності безвідмовної роботи.

2. Також варто зазначити, що виграш справедливий тільки у тому випадку, коли складові частини систем, які відповідають за рекофігурацію (ВО та СР), є абсолютно надійними. Насправді реалізація цього припущення вимагає додаткових витрат – використання більш надійних елементів і спеціальних методів проектування, а також індивідуального підходу, який враховує специфіку застосування системи.

3. Розглянута КМС, завдяки поблочному резервуванню і реконфігурації, набуває властивостей відмовостійкості та підвищення готовності. Розширюючи надалі функції КМС, можливо також реалізувати і деякі процеси самовідновлення даної системи. Запропонована КМС є досить простою для аналізу і може бути реалізована при відносно невеликих витратах технічних засобів.

3.1.2 Порівняльна оцінка надійності КМС зі структурами змішаного дублювання

Одним із способів підвищення надійності системи є введення надмірності. Залежно від конструктивного виконання і структури системи надмірність можна вводити на рівні елементів, блоків, функціональних вузлів, підсистем і системи в цілому. Питання розрахунку надійності систем із загальним (на рівні системи) і поблочним резервуванням досить добре вивчені в [97]. Однак не тільки такі способи резервування систем використовуються на практиці, а є ще багато структур зі змішаним резервуванням, які і будуть розглянуті нижче як конкуруючі для КМС. Розрахунки безвідмовності надмірних невідновлювальних систем будемо проводити логіко-ймовірнісним методом із використанням апарата булевої алгебри [98] і ймовірнісно-фізичним (ЙФ) методом на основі *DN*-розподілу [90].

Примітка 3.1. ЙФ-метод [90] є одним із найбільш точних методів апріорного розрахунку надійності найрізноманітніших об'єктів. Особливо це поширюється на вироби електронної техніки, електронні пристрої та системи.

Приклад 3.1. Всі складові частини систем (блоки) рівнонадійні з середнім наробітком до відмови $T_i = T = 1000$ год. Коефіцієнт варіації наробітку до відмови блока $v_Б = 1{,}0$. Ймовірність безвідмовної роботи складової частини системи на момент сумарного напрацювання $t_н$ дорівнює $R_i(t) = R = 0{,}9$.

Система з поблоковим резервуванням і функцією виходу X_1

Чотири вузлова КМС, за умови абсолютно надійної схеми реконфігурації СР, яка не вказується на рисунку, описується ССН, зображеною на рис. 3.2.

Запишемо функцію виходу системи, використовуючи апарат булевої алгебри [90].

$$X_1 = (A + B)(C + D)(E + F)(G + H).$$

Запишемо вираз для ймовірності безвідмовної роботи.

$$R(X_1) = R[(A+B)(C+D)(E+F)(G+H)] = [R(A)+R(B)-R(A)R(B)]\times$$

$$\times[R(C)+R(D)-R(C)R(D)]\cdot[R(E)+R(F)-R(E)R(F)]\cdot[R(G)+R(H)-R(G)R(H)].$$

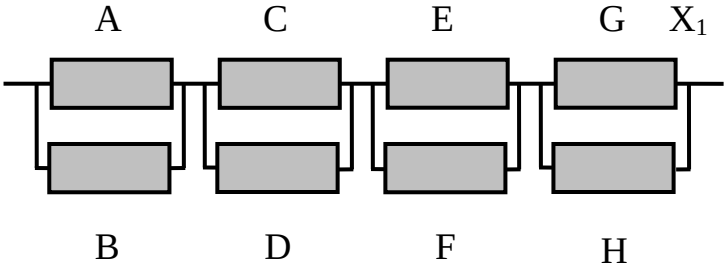


Рисунок 3.2 – Структурна схема надійності надлишкової системи з поблоковим резервуванням

Логіко-ймовірнісний метод

Обчислимо ймовірність безвідмовної роботи за отриманим виразом. $R(X_1)=$(0,9+0,9-0,9·0,9) (0,9+0,9-0,9·0,9) (0,9+0,9-0,9·0,9) (0,9+0,9-0,9·0,9)=0,99^4=0,96059.

ЙФ-метод

Обчислимо середній наробіток до відмови дубльованого блока системи: $T_{ДБ} = \sqrt{2}\cdot T = 1414$ год. Обчислимо середній наробіток до відмови системи: $T(X_1) = \left[4T_{ДБ}^{-2}\right]^{-1/2} = 707{,}1$ год. Обчислимо $R(X_1)$ для $t_н$=240 год.

Для $x = \dfrac{t_н}{T_{ДБ}}$=0,17 та $\nu = \dfrac{\nu_Б}{\sqrt{2}}$=0,7 за таблицями *DN*-розподілу ([69] або Додаток Д, табл. Д.1-Д.14) знаходимо $Q_{ДБ}(t_н)$=0,00352, звідки $R_{ДБ}(t_н) = 1 - Q_{ДБ}(t_н)$=0,99648. $R(X_1) = \left[R_{ДБ}(t_н)\right]^4$=0,99648^4=0,98599.

Система зі змішаним (вузловим і поблоковим) резервуванням і функцією виходу X_2

Розглянемо надлишкову систему зі змішаним резервуванням, структурна схема надійності якої наведена на рис. 3.3.

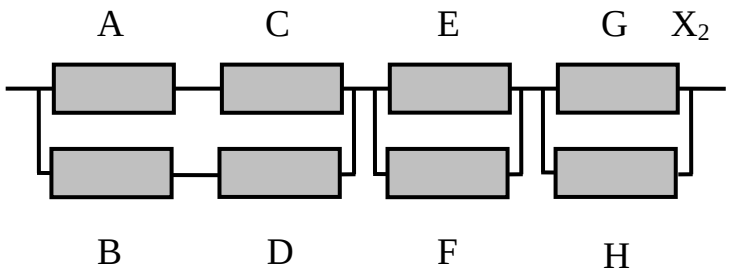


Рисунок 3.3 – Структурна схема надійності надлишкової системи з вузловим і блоковим резервуванням

Запишемо функцію виходу системи у вигляді: $X_2 = (AC + BD)(E + F)(G + H)$.

Запишемо вираз для ймовірності безвідмовної роботи.

$$R(X_2) = R[(AC + BD)(E + F)(G + H)] = [R(AC) + R(BD) - R(ACBD)] \times$$
$$\times [R(E) + R(F) - R(E)R(F)] \cdot [R(G) + R(H) - R(G)R(H)] =$$
$$= [R(A)R(C) + R(B)R(D) - R(A)R(B)R(C)R(D)] \times$$
$$\times [R(E) + R(F) - R(E)R(F)] \cdot [R(G) + R(H) - R(G)R(H)].$$

Логіко-ймовірнісний метод

Обчислимо ймовірність безвідмовної роботи за отриманим виразом $R(X_2) = (0{,}9^2 + 0{,}9^2 - 0{,}9^4) \cdot 0{,}99^2 = 0{,}944718$.

ЙФ-метод

Обчислимо середній наробіток до відмови функціонального вузла системи: $T_{AC} = T_{BD} = T_{ФВ} = \frac{T}{\sqrt{2}} = 707{,}1$ год. Обчислимо середній наробіток до відмови дубльованого функціонального вузла системи: $T_{ДФВ} = \sqrt{2} \cdot T_{ФВ} = T = 1000$ год. Обчислимо середній наробіток до відмови системи: $T(X_2) = \left[T_{ДФВ}^{-2} + 2T_{ДБ}^{-2}\right]^{-1/2} = 707{,}1$ год. Обчислимо $R(X_2)$ для $t_н$=240 год. Для $x = \frac{t_н}{T_{ДФВ}}$=0,24 та $\nu = \frac{\nu_{ФВ}}{\sqrt{2}} = \frac{\nu_Б}{\sqrt{2}}$=0,7 за таблицями *DN*-розподілу знаходимо $Q_{ÄÔÂ}(t_í)$=0,02222, звідки $R_{ДФВ}(t_н) = 1 - Q_{ДФВ}(t_н)$=0,97778.

$R(X_2) = R_{ДФВ}(t_н) \cdot [R_{ДБ}(t_н)]^2$=0,97778·0,99648^2=0,97091.

Система зі змішаним (вузловим і поблоковим) резервуванням і функцією виходу X_3

Розглянемо надлишкову систему зі змішаним резервуванням, структурна схема надійності якої наведена на рис. 3.4.

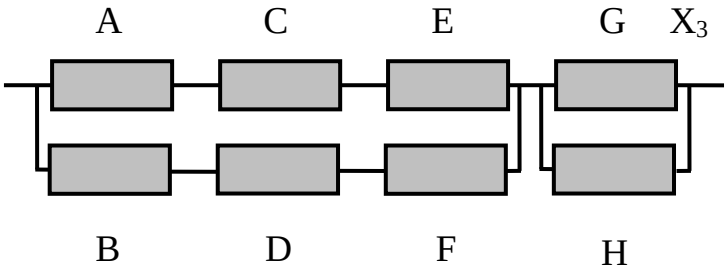


Рисунок 3.4 – Структурна схема надійності надлишкової системи з вузловим і поблоковим резервуванням

Запишемо функцію виходу системи у вигляді: $X_3 = (ACE + BDF)(G + H)$.

Запишемо вираз для ймовірності безвідмовної роботи.

$$R(X_3) = R[(ACE + BDF)(G + H)] = [R(ACE) + R(BDF) - R(ACEBDF)]\times$$
$$\times[R(G) + R(H) - R(G)R(H)] = [R(A)R(C)R(E) + R(B)R(D)R(F) - R(A)R(B)R(C)R(D)R(E)R(F)]\times$$
$$\times[R(G) + R(H) - R(G)R(H)].$$

Логіко-ймовірнісний метод

Обчислимо ймовірність безвідмовної роботи за отриманим виразом $R(X_3) = (0{,}9^3+0{,}9^3-0{,}9^6)\cdot 0{,}99=0{,}917334$.

ЙФ-метод

Обчислимо середній наробіток до відмови функціонального вузла системи: $T_{ACE} = T_{BDF} = T_{ФВ} = \frac{T}{\sqrt{3}} = 577$ год. Обчислимо середній наробіток до відмови дубльованого функціонального вузла системи: $T_{ДФВ} = \sqrt{2}\cdot T_{ФБ} = 816$ год.

Обчислимо середній наробіток до відмови системи: $T(X_3)=\left[T_{ДФВ}^{-2}+T_{ДБ}^{-2}\right]^{-1/2}=707{,}1$ год.

Обчислимо $R(X_3)$ для $t_н$=240 год. Для $x=\frac{t_н}{T_{ДФВ}}$=0,29 та $\nu=\frac{\nu_{ФВ}}{\sqrt{2}}=\frac{\nu_Б}{\sqrt{2}}$=0,7 за таблицями *DN*-розподілу знаходимо $Q_{ДФВ}(t_н)$=0,04823, звідки $R_{ДФВ}(t_н)=1-Q_{ДФВ}(t_н)$=0,95177.

$R(X_3)=R_{ДФВ}(t_н)\cdot R_{ДБ}(t_н)$=0,95177·0,99648=0,94842.

Система з резервуванням на рівні системи і функцією виходу X_4

Розглянемо надлишкову систему з резервуванням на рівні системи, структурна схема надійності якої наведена на рис. 3.5.

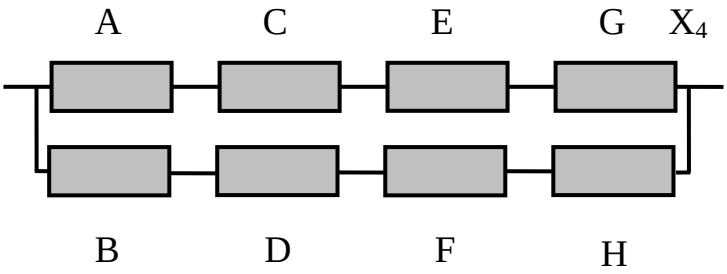


Рисунок 3.5 – Структурна схема надійності надлишкової системи з системним резервуванням

Запишемо функцію виходу системи у вигляді $X_4=(ACEG+BDFH)$.

Запишемо вираз для ймовірності безвідмовної роботи.

$$R(X_4)=R[(ACEG+BDFH)]=[R(ACEG)+R(BDFH)-R(ACEGBDFH)]=$$
$$=R(A)R(C)R(E)R(G)+R(B)R(D)R(F)R(H)-R(A)R(B)R(C)R(D)R(E)R(F)R(G)R(H).$$

Логіко-ймовірнісний метод

Обчислимо ймовірність безвідмовної роботи за отриманим виразом. $R(X_4)=(0{,}9^4+0{,}9^4-0{,}9^8)$=0,881733.

ЙФ-метод

Обчислимо середній наробіток до відмови функціонального вузла системи:

$T_{ACEG} = T_{BDFH} = T_{ФВ} = \frac{T}{\sqrt{4}} = 500$ год. Обчислимо середній наробіток до відмови дубльованого функціонального вузла системи: $T_{ДФВ} = \sqrt{2} \cdot T_{ФВ} = 707{,}1$ год.

Обчислимо середній наробіток до відмови системи: $T(X_4) = T_{ДФВ} = 707{,}1$ год. Обчислимо $R(X_4)$ для $t_н$=240 год. Для $x = \frac{t_н}{T_{ДФВ}}$=0,34 и $\nu = \frac{\nu_{ФВ}}{\sqrt{2}} = \frac{\nu_Б}{\sqrt{2}}$=0,7 за таблицями *DN*-розподілу знаходимо $Q_{ДФВ}(t_н)$=0,08338, звідки $R_{ДФВ}(t_н) = 1 - Q_{ДФВ}(t_н)$=0,91662. $R(X_4) = R_{ДФВ}(t_н)$=0,91662.

Підсумки дослідження

1. Залежність ймовірності безвідмовної роботи системи від способу введення надмірності приведена на рис. 3.6.

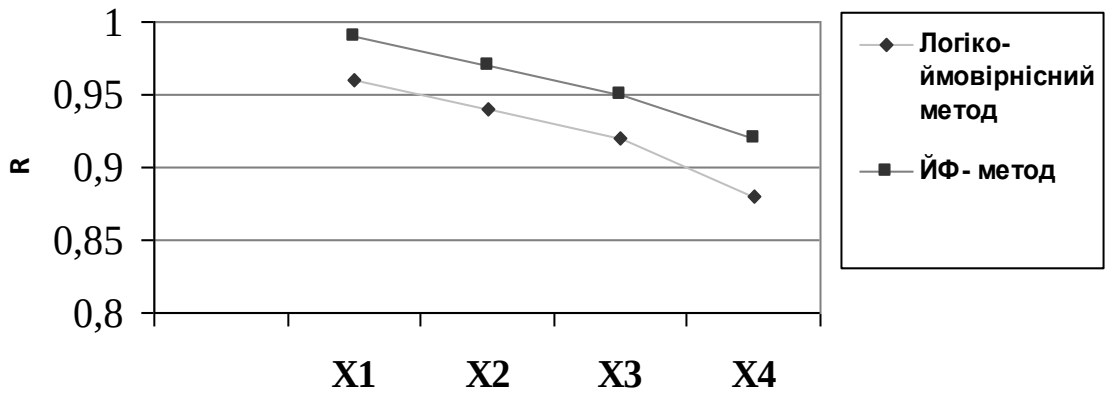


Рисунок 3.6 – Залежність безвідмовної роботи системи від способу введення надлишковості

Не важко бачити, що найбільшим значенням ймовірності безвідмовної роботи характеризується КМС – з поблочним резервуванням і функцією виходу, що підтверджує висновки, зроблені в [8].

2. Найбільш близькі оцінки ймовірності безвідмовної роботи по відношенню до логіко-ймовірнісного методу розрахунку, заснованого на класичних теоремах теорії ймовірностей, дає ЙФ-метод.

3. За умови рівнонадійності блоків і зміни способу змішаного резервування системи оцінка середнього наробітку до відмови практично не змінюється в рамках *DN*-розподілу. Це підтверджує висновок [99] про те, що середній час справної

роботи резервованої системи є незадовільним критерієм оцінки ефективності способу резервування. Найбільш інформативним є такий показник, як ймовірність безвідмовної роботи або ймовірність відмови.

3.1.3 Дослідження надійності КМС ЙФ-методом

ЙФ-метод [90] є одним із найбільш точних методів апріорного розрахунку надійності найрізноманітніших об'єктів. Особливо це поширюється на вироби електронної техніки, електронні пристрої та системи. Нижче проводяться дослідження ЙФ-методом залежності ймовірності безвідмовної роботи КМС від кількості дубльованих вузлів.

Приклад 3.2. Нехай $T_{ФБ}$=1000 год, t=500 год та $V_{ФБ}$=0,75, справедливий дифузійний немонотонний закон розподілу (*DN*-розподілу). Розглянемо структуру, зображену на рис. 3.7.

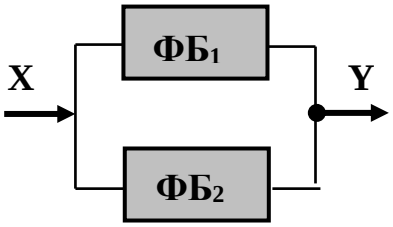


Рисунок. 3.7 – Дубльована структура

Обчислимо середній наробіток до відмови системи: $T_1 = T_{ФБ}\sqrt{n} = 1000 \cdot \sqrt{2} = 1414\,г.$

Обчислимо величину відносного напрацювання x: $x = \frac{t}{T_1} = \frac{500}{1414} = 0{,}354$.

Обчислимо параметр форми *DN*-розподілу: $\nu = \frac{V_{ФБ}}{\sqrt{n}} = \frac{V_{ФБ}}{\sqrt{2}} = \frac{0{,}75}{1{,}414} = 0{,}53.$

За таблицею DN-розподілу для значення ν=0,5 обчислимо ймовірність відмови: $F_1 = 0{,}02149$, звідки $R_1 = 1 - F_1 = 0{,}97851.$

Приклад 3.3. Розіб'ємо ФБ на два рівнонадійних ФСБ із середнім наробітком до відмови: $T_{ФСБ} = \sqrt{n} \cdot T_{ФБ}$, де n=2 – кількість ФСБ у каналі, $T_{ФБ}$=1000 год, звідки $T_{ФСБ}$=1414 год, t=500 год та $V_{ФСБ}$=0,75. Розглянемо структуру, зображену на рис. 3.8:

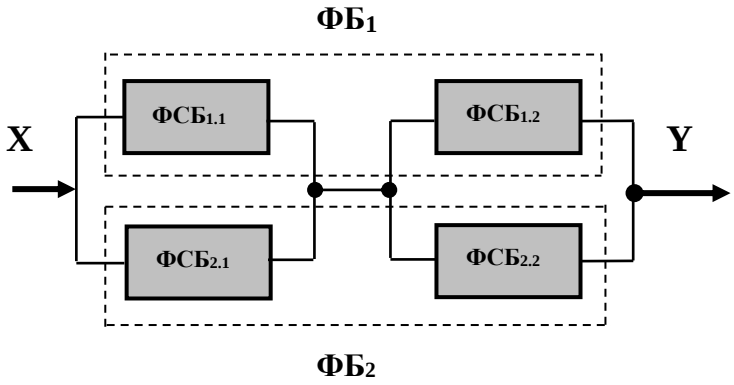


Рисунок 3.8 – Квазімісткова структура з 2-х вузлів

Обчислимо середній наробіток до відмови дубльованого вузла системи:

$$T_{ДВ} = T_{ФСБ}\sqrt{n} = 1414 \cdot \sqrt{2} = 1999\,год.$$

Обчислимо величину відносного напрацювання x: $x = \dfrac{t}{T_{ДВ}} = \dfrac{500}{1999} = 0{,}25.$

Обчислимо параметр форми *DN*-розподілу: $\nu = \dfrac{V_{ФСБ}}{\sqrt{n}} = \dfrac{V_{ФСБ}}{\sqrt{2}} = \dfrac{0{,}75}{1{,}414}$=0,53.

За таблицею DN-розподілу для значення ν=0,5 обчислимо ймовірність відмови дубльованого вузла: $F_{ДВ} = 0{,}00221,$ звідки $R_{ДВ} = 1 - F_{ДВ} = 0{,}99779.$

Обчислимо ймовірність безвідмовної роботи послідовної системи з 2 дубльованих вузлів; $R_2 = R_{ДВ} \cdot R_{ДВ} = R_{ДВ}^2 = 0{,}99558.$

Приклад 3.4. Розіб'ємо ФБ на три рівнонадійних ФСБ з середнім наробітком до відмови $T_{ФСБ} = \sqrt{n} \cdot T_{ФБ}$, де n=3 – кількість ФСБ у каналі, $T_{ФБ}$=1000 год, звідки $T_{ФСБ}$=1732 год, t=500 год та $V_{ФСБ}$=0,75. Розглянемо структуру, зображену на рис. 3.9.

Обчислимо середній наробіток до відмови дубльованого вузла системи:

$$T_{ДВ} = T_{ФСБ}\sqrt{n} = 1732 \cdot \sqrt{2} = 2449\,год.$$

Обчислимо величину відносного напрацювання x: $x = \frac{t}{T_{ДВ}} = \frac{500}{2449} = 0{,}2.$

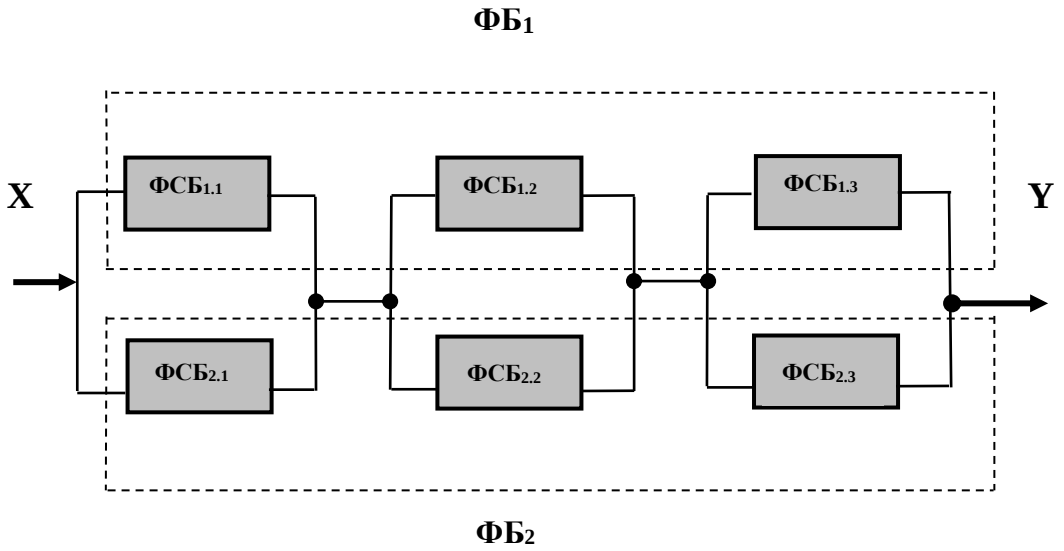


Рисунок 3.9 – Квазімісткова структура з 3-х вузлів

Обчислимо параметр форми *DN*-розподілу: $\nu = \frac{V_{ФСБ}}{\sqrt{n}} = \frac{V_{ФСБ}}{\sqrt{2}} = \frac{0{,}75}{1{,}414} = 0{,}53.$

За таблицею DN-розподілу для значення $\nu = 0{,}5$ обчислимо ймовірність відмови дубльованого вузлу: $F_{ДВ} = 0{,}00029$, звідки $R_{ДВ} = 1 - F_{ДВ} = 0{,}99971.$

Обчислимо ймовірність безвідмовної роботи послідовної системи з 3 дубльованих вузлів: $R_2 = R_{ДВ} \cdot R_{ДВ} \cdot R_{ДВ} = R_{ДВ}^3 = 0{,}99913.$

Підсумки дослідження

1. Аналіз залежності ймовірності безвідмовної роботи КМС від кількості дубльованих вузлів ЙФ-методом показав, що з ростом кількості вузлів у КМС відзначається і зростання ймовірності безвідмовної роботи структури.

2. Ймовірность безвідмовної роботи КМС з 2-ма і 3-ма вузлами перевищує ймовірність безвідмовної роботи класичної дубльованої структури.

3.1.4 Дослідження надійності КМС класичним методом

У [7] вперше була запропонована двоканальна відмовостійка структура, названа згодом квазімісковою, і отримала подальший розвиток у роботах [3, 10]. Вона показала свої реальні переваги над відомою двоканальної дубльованою структурою.

Даний факт переваг квазімісткової структури підтверджується іншим дослідником у [100] для схожої системи, названої ним резервованою системою з дубльованими підсистемами і детектором помилок. При такому резервуванні після кожного зарезервованого елемента встановлений детектор помилок, який фіксує розбіжність результатів роботи основного і резервного елементів. При виявленні розбіжності запускається діагностична програма, яка визначає, який саме блок відмовив, і виключає його з роботи. При цьому вказані такі переваги структури: значне збільшення ймовірності безвідмовної роботи обчислювальної системи; підвищення ремонтопридатності внаслідок зростання діагностичної точності у визначенні елемента, що відмовив.

Останнім часом переваги квазімісткової структури доводилися шляхом імітаційного моделювання [8, 29], статистичного моделювання [17, 77, 99] і шляхом аналітичного розрахунку ЙФ-методом [24]. Всі ці підходи засновані на гіпотезі про дифузійний закон розподілу (*DN*-розподіл). Використання будь-якої теоретичної моделі надійності пов'язано в тій чи іншій мірі з методичними помилками, які впливають на точність результату. Незважаючи на те, що *DN*-розподіл як двопараметрична ймовірнісно-фізична модель має їх мінімальні значення [90]), проте представляє особливий теоретичний інтерес порівняння результатів оцінки ймовірності безвідмовної роботи, отриманої на основі параметричних методів, наприклад, ЙФ-метода, з результатами, отриманими класичним методом, заснованим на базових теоремах теорії ймовірностей.

Розглянемо невідновлювальну дубльовану структуру, що складається із двох функціональних блоків ФБ1 і ФБ2 (рис. 3.7). При відмові одного з каналів система

продовжує роботу через інший, який зберіг працездатність. Роботу каналів контролює СР і ВО, які в подальших розрахунках вважаються абсолютно надійними і не показуються на рисунку.

Оскільки дубльована структура включає три працездатних стани, користуючись теоремою сумування ймовірностей, запишемо вираз для ймовірності безвідмовної роботи: $R(t) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3)$.

Розпишемо ймовірності працездатних подій:

$$P(A_1) = R_1 \cdot R_2,\ P(A_2) = F_1 \cdot R_2 = (1 - R_1) \cdot R_2;\ P(A_3) = F_2 \cdot R_1 = (1 - R_2) \cdot R_1.$$

При рівнонадійних ФБ:

$$P(A_1) = R^2{}_{ФБ},\ P(A_2) = (1 - R_{ФБ}) \cdot R_{ФБ};\ P(A_3) = (1 - R_{ФБ}) \cdot R_{ФБ}.$$

Тоді отримаємо ймовірність безвідмовної роботи структури:

$$R_1(t) = R_{ФБ}^2 + (1 - R_{ФБ}) \cdot R_{ФБ} + (1 - R_{ФБ}) \cdot R_{ФБ} = 2R_{ФБ} - R_{ФБ}^2.$$

Приклад 3.5. Нехай $T_{ФБ}$=1000 год. При справедливості дифузійного немонотонного закону розподілу (*DN*-розподілу) для t=500 год та $V_{ÔÁ}$=0,75 за таблицями *DN*-розподілу обчислимо $R_{ФБ}$=0,7452 (за методикою п. 3.1.3), звідки через (3.12) отримуємо $R_1(t) = 2R_{ФБ} - R_{ФБ}^2$=0,9351.

Розглянемо невідновлювальну квазімісткову структуру з 2-х вузлів (рис. 3.8). Складемо таблицю станів квазімісткової структури з 2-х вузлів (табл. 3.1), яка включає дев'ять працездатних станів.

Скористаємося теоремою сумування ймовірностей і запишемо вираз для ймовірності безвідмовної роботи:

$$R(t) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + P(A_4) + P(A_5) + P(A_6) + P(A_7) + P(A_8) + P(A_9).$$

Таблиця 3.1 – Таблиця станів квазімісткової структури з 2-х вузлів

Позначення працездатного стану структури. A_i	ФБ, що відмовили за час, t	ФБ, що працювали без відмов протягом часу, t
A_1	-	1.1, 1.2, 2.1, 2.2
A_2	1.1	1.2, 2.1, 2.2
A_3	2.1	1.1, 1.2, 2.2
A_4	1.2	1.1, 2.1, 2.2
A_5	2.2	1.1, 1.2, 2.1
A_6	1.1, 1.2	2.1, 2.2
A_7	1.1, 2.2	1.2, 2.1
A_8	1.2, 2.1	1.1, 2.2
A_9	2.1, 2.2	1.1, 1.2

Розпишемо ймовірності працездатних подій:

$$P(A_1) = R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_2) = F_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{1.1}) \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_3) = F_{2.1} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{2.1}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_4) = F_{1.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{1.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_5) = F_{2.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2} = (1 - R_{2.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2},$$

$$P(A_6) = F_{1.1} \cdot F_{1.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{1.1}) \cdot (1 - R_{1.2}) \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_7) = F_{1.1} \cdot F_{2.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2} = (1 - R_{1.1}) \cdot (1 - R_{2.2}) \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2},$$

$$P(A_8) = F_{2.1} \cdot F_{1.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{2.1}) \cdot (1 - R_{1.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_9) = F_{2.1} \cdot F_{2.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} = (1 - R_{2.1}) \cdot (1 - R_{2.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2}.$$

При рівнонадійних ФСБ:

$$P(A_1) = R_{ФСБ}^4; P(A_2) = (1 - R_{ФСБ}) \cdot R_{ФСБ}^3,\ P(A_3) = (1 - R_{ФСБ}) \cdot R_{ФСБ}^3,$$

$$P(A_4) = (1 - R_{ФСБ}) \cdot R_{ФСБ}^3, P(A_5) = (1 - R_{ФСБ}) \cdot R_{ФСБ}^3,\ P(A_6) = (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R_{ФСБ}^2,$$

$$P(A_7) = (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R_{ФСБ}^2, P(A_8) = (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R_{ФСБ}^2, P(A_9) = (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R_{ФСБ}^2.$$

Далі отримаємо ймовірність безвідмовної роботи структури:

$$R_2(t) = R_{ФСБ}^4 + 4 \cdot (1 - R_{ФСБ}) \cdot R^3{}_{ФСБ} + 4 \cdot (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R^2{}_{ФСБ}.$$

Якщо при декомпозиції ФБ не вдається його розділити на абсолютно рівнонадійні ФСБ, тобто, має місце така практична ситуація, при якій рівнонадійні ФСБ у першій парі ФСБ$_{1.1}$ та ФСБ$_{2.1}$, а ФСБ$_{1.2}$ та ФСБ$_{2.2}$ також рівнонадійні, але їх рівень надійності відрізняється від рівня надійності ФСБ першої пари. У цьому випадку при попарні рівнонадійності ФСБ кожного вузла, замінимо $R_{1.1}$ та $R_{2.1}$ на R_1 та $R_{1.2}$ та $R_{2.2}$ на R_2 і отримаємо такі вирази для ймовірностей подій:

$$P(A_1) = R_1^2 \cdot R_2^2,\ P(A_2) = P(A_3) = (1 - R_1) \cdot R_1 \cdot R_2^2,\ P(A_4) = P(A_5) = (1 - R_2) \cdot R_2 \cdot R_1^2,$$

$$P(A_6) = P(A_7) = P(A_8) = P(A_9) = (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot R_1 \cdot R_2.$$

Далі, отримаємо ймовірність безвідмовної роботи структури:

$$R_2(t) = R_1^2 \cdot R_2^2 + 2 \cdot (1 - R_1) \cdot R_1 \cdot R_2^2 + 2 \cdot (1 - R_2) \cdot R_2 \cdot R_1^2 + 4 \cdot (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot R_1 \cdot R_2.$$

Приклад 3.6. Нехай ФСБ рівнонадійні і $T_{ФСБ} = \sqrt{n} \cdot T_{ФБ}$, де n=2 – кількість ФСБ у каналі, $T_{ФБ}$=1000 год, звідки $T_{ФСБ}$=1414 год. При справедливості дифузійного немонотонного закону розподілу (*DN*-розподілу) для t=500 год. та $V_{ФСБ}$=0,75 за таблицями *DN*-розподілу обчислимо $R_{ФСБ}$=0,8875 , звідки

$$R_2(t) = R^4_{ФСБ} + 4\cdot(1-R_{ФСБ})\cdot R^3{}_{ФСБ} + 4\cdot(1-R_{ФСБ})^2\cdot R^2{}_{ФСБ} = 0{,}9749.$$

Розглянемо невідновлювальних квазімісткову структуру з 3-х вузлів (рис. 3.9). Складемо таблицю станів квазімісткової структури з 3-х вузлів (Додаток В, п. 4.6.1), яка включає 25 працездатних станів.

Коли $T_{ФСБ1.1} = T_{ФСБ2.1} = 1200$ год та $T_{ФСБ1.2} = T_{ФСБ2.2} = 1600$ год, інші вхідні дані t та $V_{ФСБ}$ візьмемо із прикладу 2. Для t=500 год та $V_{ФСБ}$=0,75 за таблицями *DN*-розподілу обчислимо R_1=0,8226 та R_2=0,9209, звідки

$$R_2(t) = R_1^2\cdot R_2^2 + 2\cdot(1-R_1)\cdot R_1\cdot R_2^2 + 2\cdot(1-R_2)\cdot R_2\cdot R_1^2 + 4\cdot(1-R_1)\cdot(1-R_2)\cdot R_1\cdot R_2 = 0{,}9625.$$

Скористаємося теоремою додавання ймовірностей і запишемо вираз для ймовірності безвідмовної роботи:

$$R(t) = P(A_1) + P(A_2) + ... + P(A_{25}).$$

Розписавши ймовірності працездатних подій (Додаток В, п. 4.6.2), отримаємо ймовірність безвідмовної роботи структури:

$$R_3(t) = R^6_{ФСБ} + 6\cdot(1-R_{ФСБ})\cdot R^5{}_{ФСБ} + 12\cdot(1-R_{ФСБ})^2\cdot R^4{}_{ФСБ} + 6\cdot(1-R_{ФСБ})^3\cdot R^3{}_{ФСБ}.$$

Приклад 3.7. Нехай $T_{ФСБ} = \sqrt{n}\cdot T_{ФБ}$, де n=3 – кількість ФСБ у каналі, $T_{ФБ}$=1000 год, звідки $T_{ФСБ}$=1732 год. При справедливості дифузійного немонотонного закону розподілу (*DN*-розподілу) для t=500 год та $V_{ФСБ}$=0,75 за таблицями *DN*-розподілу обчислимо $R_{ФСБ}$=0,9361, звідки

$$R_3(t) = R^6_{ФСБ} + 6\cdot(1-R_{ФСБ})\cdot R^5{}_{ФСБ} + 12\cdot(1-R_{ФСБ})^2\cdot R^4{}_{ФСБ} + 6\cdot(1-R_{ФСБ})^3\cdot R^3{}_{ФСБ} = 0{,}9874.$$

Підсумки дослідження

1. Аналіз залежності ймовірності безвідмовної роботи КМС від кількості дубльованих вузлів класичним методом також

показав, що з ростом кількості вузлів у КМС відзначається і зростання ймовірності безвідмовної роботи структури.

2. Ймовірність безвідмовної роботи КМС з 2-ма і 3-ма вузлами перевищує ймовірність безвідмовної роботи класичної дубльованої структури.

3. Найбільший виграш за ймовірністю безвідмовної роботи КМС досягається при рівності надійності ФСБ і дубльованих вузлів відповідно.

3.2 Дослідження надійності КМС методом статистичного моделювання

3.2.1 Пакет програм RELIABmod v.2.0

Для статистичного моделювання надійності складних систем був використаний спеціально розроблений пакет програм – RELIABmod v.2.0 (рис. 3.10) [99].

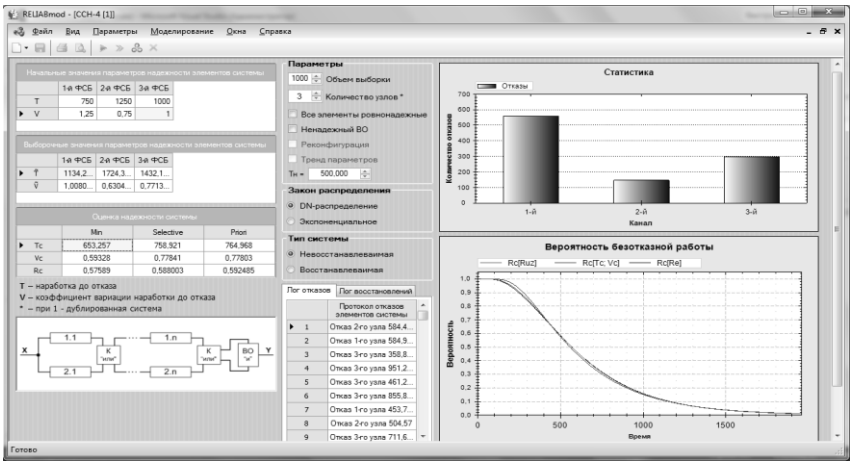


Рисунок 3.10 – Екранна форма пакета програм RELIABmod v.2.0

Вказаний пакет дозволяє проводити прогнозування надійності об'єктів, що мають різні ССН.

Пакет програм RELIABmod v.2.0 має такі особливості:

• здійснює генерацію випадкових величин, що мають експоненційний розподіл, розподіл Вейбулла, логарифмічно-нормальний розподіл, нормальний розподіл та *DN*-розподіл;

• враховує надійність відновлюючого органа системи;

• враховує можливості реконфігурації системи при відмові її складових частин;

• враховує тренд параметрів надійності складових частин системи в часі експлуатації;

• проводить розрахунок кількісних показників надійності системи, що моделюється за даними про надійність елементів системи, отриманими в результаті моделювання;

• здійснює графічну інтерпретацію результатів моделювання.

При моделюванні основним законом розподілу для електронних пристроїв, засобів обчислювальної техніки і комп'ютерних систем приймається *DN*-розподіл наробітку до відмови (на відмову).

Функція *DN*-розподілу має такий вигляд:

$$DN(t_н; s, v) = \Phi\left(\frac{\frac{t_н}{s} - 1}{v\sqrt{t_н / s}}\right) + \exp\left(2v^{-2}\right)\Phi\left(-\frac{\frac{t_н}{s} + 1}{v\sqrt{t_н / s}}\right), \tag{3.1}$$

де $\Phi(\bullet)$ – нормований нормальний розподіл s – математичне очікування наробітку до відмови v – коефіцієнт варіації наробітку до відмови $t_н$ – експлуатації (напрацювання).

Найбільш часто в розрахунках функція *DN*-розподілу використовується у зручному для табулювання вигляді:

$$DN(x, v) = \Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) + \exp\left(2v^{-2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{x+1}{v\sqrt{x}}\right), \tag{3.2}$$

де $x = \frac{t_н}{s}$ – відносне напрацювання.

3.2.2 Моделювання надійності невідновлюваної КМС

Блок-схема алгоритму моделювання надійності не відновлюваної квазімісткової структури наведена в Додатку В, п. В 4.4 [101].

Як теоретична модель надійності всіх компонентів системи використовується дифузійний немонотонний розподіл (*DN*-розподіл) напрацювання до відмови.

Примітка 3.2. Для простоти аналізу результатів приймається, що пристрої СР є абсолютно надійними.

Опис алгоритму статистичного моделювання надійності

Моделювання надійності системи починається з генерації випадкових наробіток до відмови всіх елементів (ФСБ) (надалі в формулах *E*), що входять до складу структури. Генерація наробіток до відмови всіх *E* системи з урахуванням двох каналів 1 і 2:

$$\hat{t}_{Eij1} = DN_GEN(T_{Ej},\ V_{Ej}), \hat{t}_{Eij2} = DN_GEN(T_{Ej},\ V_{Ej}),$$

де $\hat{t}_{Eij1}$, $\hat{t}_{Eij2}$ – випадкові i-і наробітки до відмови j-го типу елементів 1 та 2 каналів; $i = 1, 2, ..., N$ – об'єм вибірки (кількість статистичних експериментів з структурою системи), $j = 1, 2, ..., n$ – кількість типів вузлів у квазімістковій структурі, $DN_GEN(\bullet)$ – генератор випадкових чисел, розподілених відповідно до *DN*-розподілу, T_{Ej}, V_{Ej} – параметри генератора, відповідно, апріорні значення середнього наробітку до відмови і коефіцієнта варіації наробітку до відмови елемента j-го типу.

2. Аналіз наробітків до відмови *E* двох каналів і визначення наробітку до відмови системи $\hat{t}_{Ci}$. Відмова системи настає у випадку відмови будь-якого з n вузлів і час відмови системи визначається за мінімальним значенням $\hat{t}_{Bij}$. Так як вузли дубльовані, то час відмови вузла $\hat{t}_{Bij}$ визначається за максимальним значенням з $\hat{t}_{Eij1}$ та $\hat{t}_{Eij2}$.

3. Обчислення середнього наробітку до відмови системи: $\hat{T}_C = \frac{\sum_{i=1}^{N} \hat{t}_{ci}}{N}$.

4. Обчислення коефіцієнта варіації наробітку до відмови системи: $\hat{V}_C = \frac{\sqrt{\hat{D}_{t_{Ci}}}}{\hat{T}_C}$,

де $\hat{D}_{t_{Ci}}$ – дисперсія наробітку до відмови системи.

5. Аналіз наробітків до відмови вузлів $\hat{t}_{Bij}$ і визначення середніх наробітків до відмови кожного типу вузла:

$$\hat{T}_{Bj} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \hat{t}_{Bij}}{N}.$$

7. Визначення середніх наробітків до відмови кожного типу *E*, використовуючи статистичну інформацію про відмови елементів обох каналів:

$$\hat{T}_{Ej1} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \hat{t}_{Eij1}}{N}; \hat{T}_{Ej2} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \hat{t}_{Eij2}}{N}.$$

Усереднене значення середнього наробітку до відмови кожного типу *E* обчислюється за формулою

$$\hat{T}_{Ej} = \frac{\hat{T}_{Ej1} + \hat{T}_{Ej2}}{2}.$$

8. Визначення коефіцієнтів варіації наробітку до відмови кожного типу вузла:

$$\hat{V}_{Bj} = \frac{\sqrt{\hat{D}_{t_{Bij}}}}{\hat{T}_{Bj}}.$$

9. Визначення коефіцієнтів варіації наробітку до відмови кожного типу *E*:

$$\hat{V}_{Ej1} = \frac{\sqrt{\hat{D}_{t_{Eij1}}}}{\hat{T}_{Ej1}};\ \hat{V}_{Ej2} = \frac{\sqrt{\hat{D}_{t_{Eij2}}}}{\hat{T}_{Ej2}}.$$

Усереднене значення коефіцієнта варіації кожного типу *E* обчислюється за формулою

$$\hat{V}_{Ej} = \frac{\hat{V}_{Ej1} + \hat{V}_{Ej2}}{2}.$$

9. Визначення ймовірності безвідмовної роботи (ВБР) кожного типу *E*: $\hat{R}_{Ej} = R_{DN}(\hat{T}_{Ej},\ \hat{V}_{Ej},\ t_H)$, де $R_{DN}(\bullet)$ - функція ВБР для *DN*-розподілу.

10. Визначення ВБР кожного типу вузла: $\hat{R}_{Bj} = R_{DN}(\hat{T}_{Bj},\ \hat{V}_{Bj},\ t_H)$.

11. Визначення ВБР системи через значення $\hat{T}_C$ та $\hat{V}_C$: $\hat{R}_C = R_{DN}(\hat{T}_C,\ \hat{V}_C,\ t_H)$.

Опис результатів дослідження надійності системи

При моделюванні було обрано такі вхідні дані:

Середній наробіток до відмови $T_{ФБ} = 1000 год$. Коефіцієнт варіації наробітку до відмови ненадлишкових *E* (ФБ, ЕОМ) $V_{ФБ} = V_E = 0{,}75$. Середній наробіток до відмови *E* визначався за формулою $T_E = \sqrt{n} \cdot T_{ФБ}$, де n – кількість вузлів у КМС. Оцінка ймовірності безвідмовної роботи елементів, вузлів і системи в цілому здійснювалася на момент сумарного напрацювання $t_н = 500 год$.

Результати статистичного моделювання та аналітичного розрахунку надійності КМС наведені в табл. 3.3.

Графічна інтерпретація результатів статистичного моделювання приведена на рис. 3.11 - 3.13.

Таблиця 3.3 – Результати моделювання надійності КМС методом "слабкої ланки"

Кількість вузлів	Середній наробіток до відмови системи, $\hat{T}_C$	Коефіцієнт варіації наробітку до відмови системи, $\hat{V}_C$	Ймовірність безвідмовної роботи системи, $\hat{R}_C$
1	1375	0,595	0,941447
2	1380	0,476	0,974066
3	1395	0,416	0,987481
4	1402	0,377	0,993361
5	1447	0,358	0,996614
6	1484	0,340	0,998116
7	1529	0,324	0,998970
8	1576	0,312	0,999444
9	1618	0,307	0,999664
10	1647	0,299	0,999775

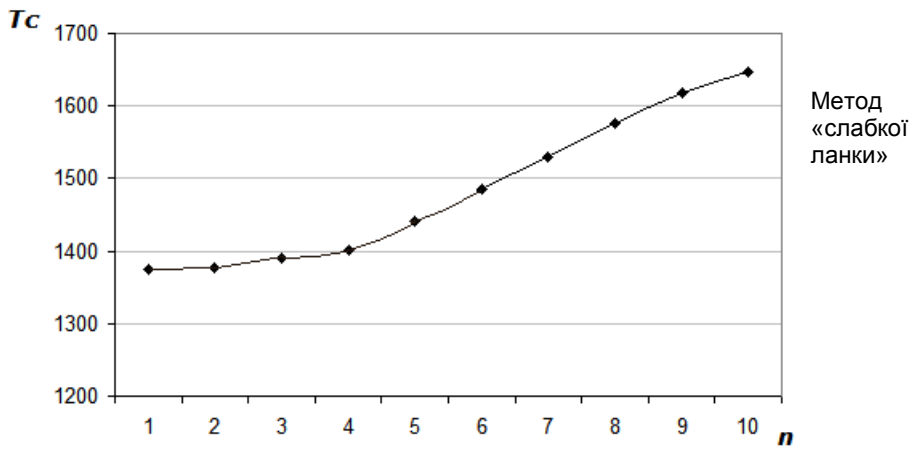


Рисунок 3.11 – Функція середнього наробітку на відмову системи в залежності від кількості вузлів

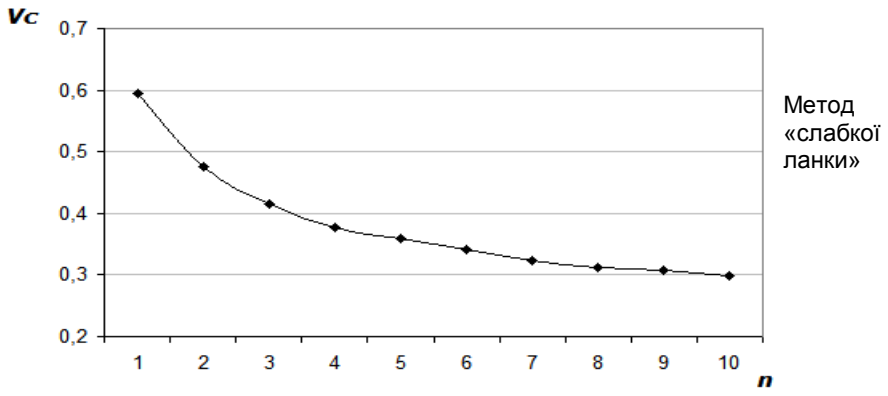


Рисунок 3.12 – Функція коефіцієнта варіації наробітку на відмову системи в залежності від кількості вузлів

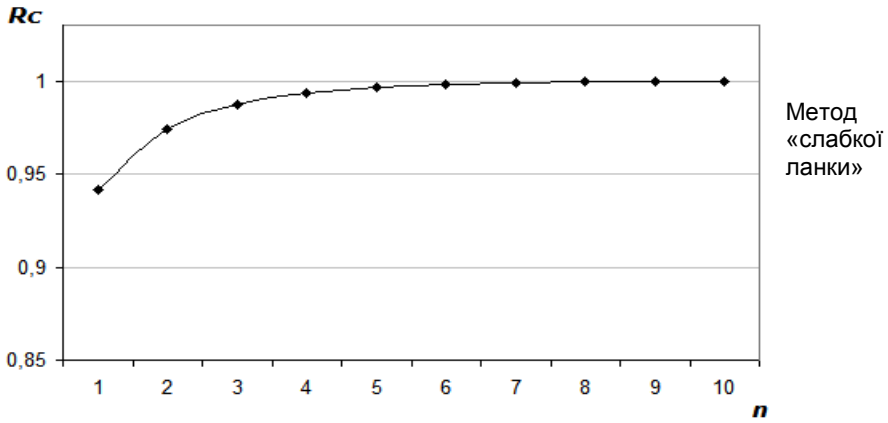


Рисунок 3.13– Функція ВБР системи в залежності від кількості вузлів

Підсумки дослідження

1. На (рис. 3.11) наведено залежності середнього наробітку до відмови системи в залежності від кількості рівнонадійних вузлів. При кількості вузлів від двох до трьох КМС дещо поступається за величиною середнього наробітку до відмови (максимально при двох вузлах на 3,3%) системі з одним вузлом, тобто дубльованої системи, а при чотирьох вузлах вже перевищує на 2%

2. Моделювання надійності КМС показало, що коефіцієнт варіації наробітку до відмови системи не є постійною величиною, рівною коефіцієнту варіації наробітку до відмови вузла (при послідовному з'єднанні рівнонадійних вузлів [101]), а має тенденцію до зменшення з ростом кількості вузлів у системі (рис. 3.12).

Обидва ці факти, що свідчать про збільшення середнього наробітку до відмови КМС і при одночасному зменшенні коефіцієнта варіації наробітку до відмови при збільшенні кількості вузлів у системі, дозволяють осмислити і причини зростання ймовірності безвідмовної роботи системи (рис. 3.13).

3. Результати статистичного моделювання системи за методом "слабкої ланки". Гіпотеза рівності коефіцієнту варіації наробітку до відмови послідовної системи, що складається з рівнонадійних елементів, коефіцієнту варіації наробітку до відмови елемента не знайшла свого підтвердження в результатах моделювання. Дослідженнями встановлено, що зі збільшенням кількості послідовно з'єднаних вузлів у квазімістковій структурі коефіцієнт варіації наробітку до відмови не є постійною величиною, а має тенденцію до зменшення.

3.2.3 Моделювання надійності відновлюваної КМС

При моделюванні відновлюваної КМС як відмовобезпечної структури, перш за все цікавить такий параметр надійності, як середній наробіток і ймовірність безвідмовної роботи до першої відмови. Це пояснюється тим, що в рамках стратегії відмовобезпечності після першої відмови система повинна переходити в захисний стан. Блок-схема алгоритму моделювання відновлюваної КМС [102] наведено у Додатку В, п. 4.5.

Для наближеної оцінки величини середнього наробітку на відмову ФСБ у залежності від часу його віртуального функціонування використовуємо формулу обліку тренда параметрів надійності [17, 103]:

$$T\left(t_{\Sigma Eij}\right) = T\left\{0{,}05 + 0{,}95\exp\left[\frac{(t_{\Sigma Eij} - T)}{(5\cdot 10^5 - T)}\cdot\left(0{,}05 + \ln(T)^{-1}\right)\right]\right\}, \tag{3.3}$$

де $t_{\Sigma Eij}$ – сумарне напрацювання елемента, T – середній наробіток до відмови

елемента. Параметри відновлення вибиралися з ряду: середній час відновлення $T_B = \{50;10;5\}$ год, коефіцієнт варіації часу відновлення $V_B = 0{,}75$.

Оцінка ймовірності безвідмовної роботи елементів, вузлів і системи в цілому здійснювалася на момент сумарного напрацювання з ряду $t_н = 3000$, 7000 та 10000 год. Результати статистичного моделювання надійності відновлюваної квазімісткової системи наведені (у скороченій формі до $n = 50$) в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати моделювання відновлюваної квазімісткової структури

Кількість вузлів	Характе-ристика надійності	Час відновлення, год		
		метод "слабкої ланки"		
		50	10	5
1	$\tilde{T}_C$	9123	28880	41277
	$\tilde{V}_C$	0,839	0,658	0,581
	$\tilde{R}_C$	0,869284	0,98395	0,99316
5	$\tilde{T}_C$	9551	28723	41267
	$\tilde{V}_C$	0,783	0,646	0,581
	$\tilde{R}_C$	0,905103	0,98533	0,99514
10	$\tilde{T}_C$	9760	28902	41336
	$\tilde{V}_C$	0,757	0,631	0,561
	$\tilde{R}_C$	0,920424	0,98785	0,9961
20	$\tilde{T}_C$	10226	29423	41434
	$\tilde{V}_C$	0,749	0,613	0,561
	$\tilde{R}_C$	0,933938	0,99104	0,99623
30	$\tilde{T}_C$	10862	30162	42701
	$\tilde{V}_C$	0,73	0,604	0,533
	$\tilde{R}_C$	0,951646	0,99308	0,99752
50	$\tilde{T}_C$	11383	32688	44698
	$\tilde{V}_C$	0,711	0,579	0,517
	$\tilde{R}_C$	0,964163	0,99717	0,99875

Графічна інтерпретація результатів статистичного моделювання приведена на рис. 3.14 – 3.16.

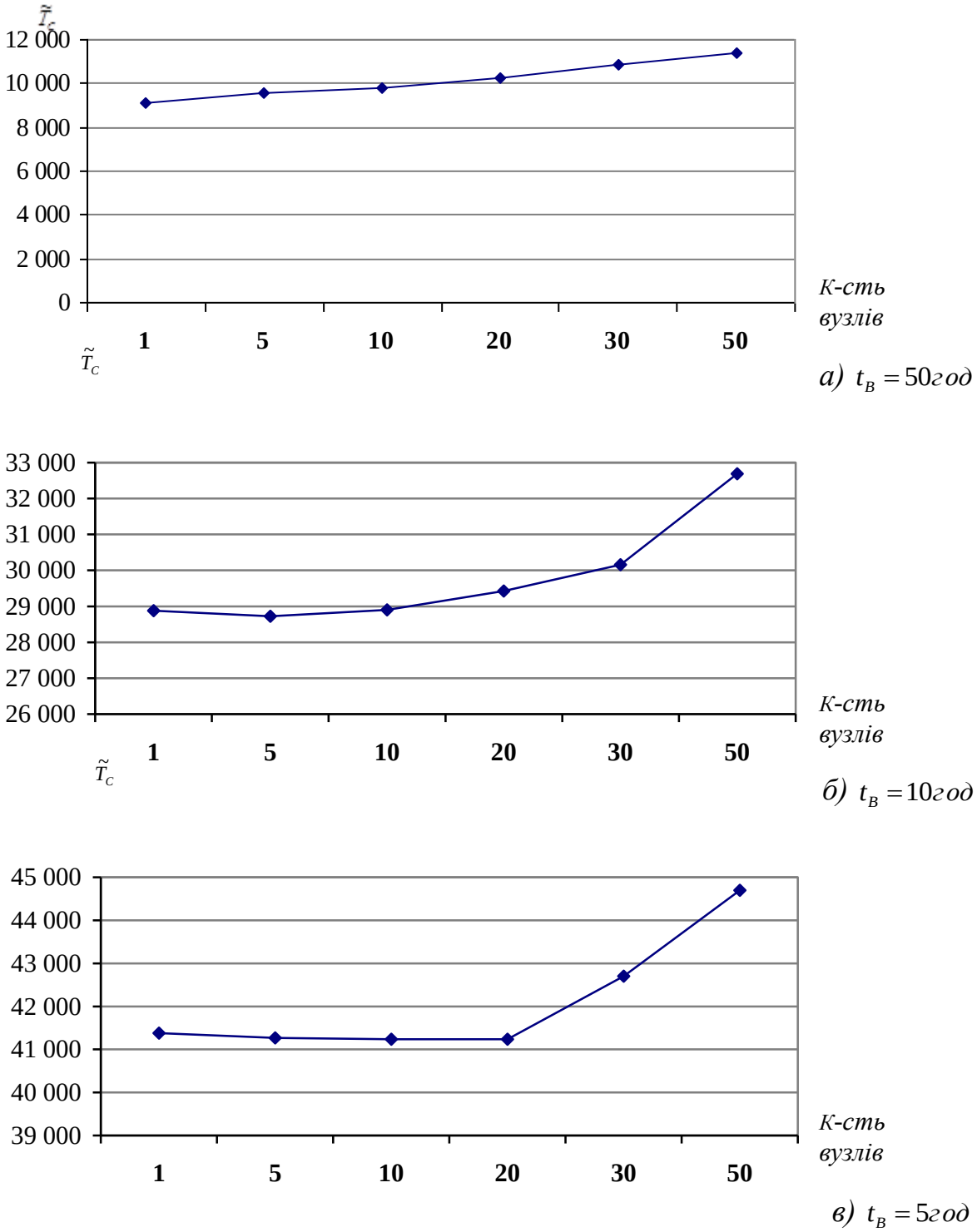
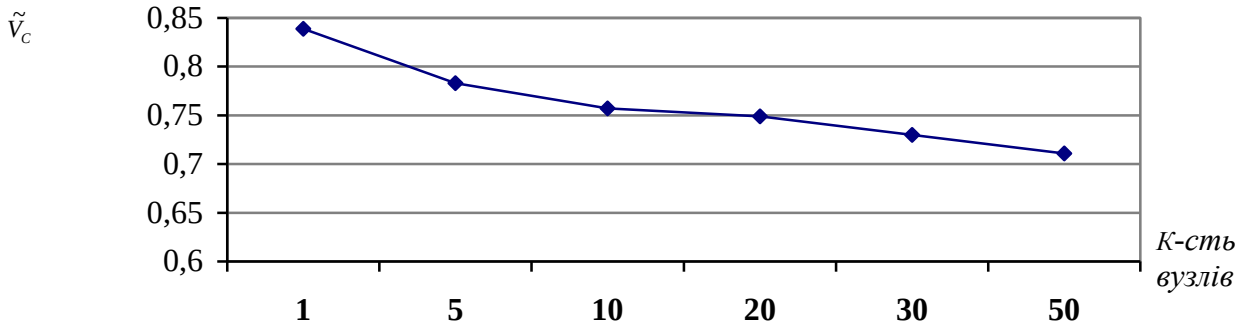
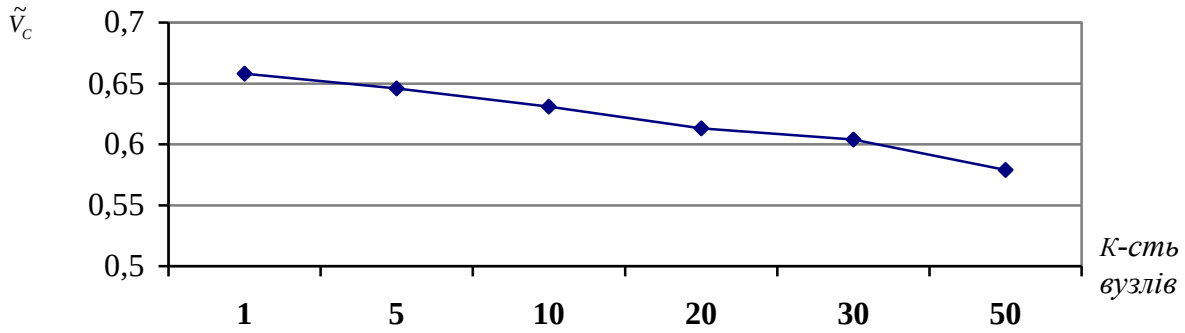


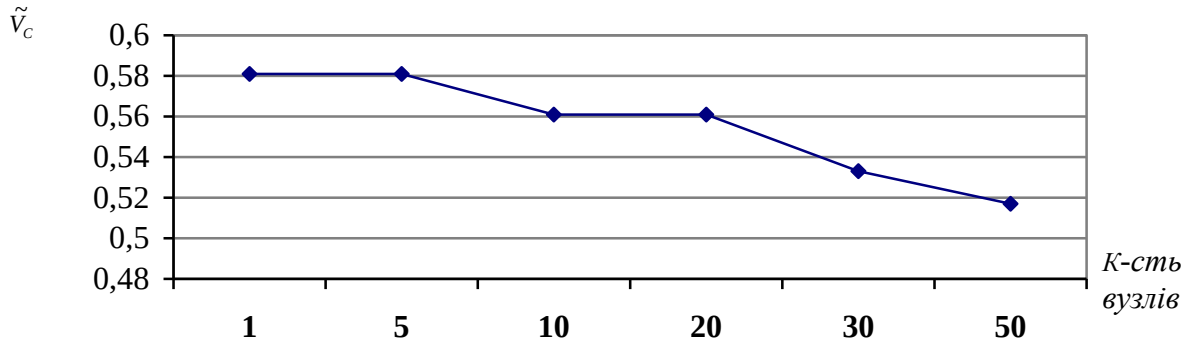
Рисунок 3.14 – Залежності середнього наробітку до першої відмови системи від кількості вузлів



а) $t_B = 50 год$

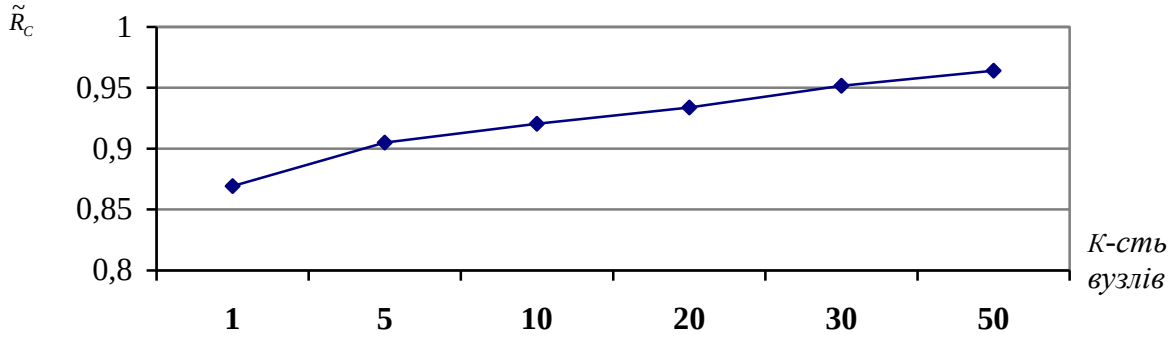


б) $t_B = 10 год$

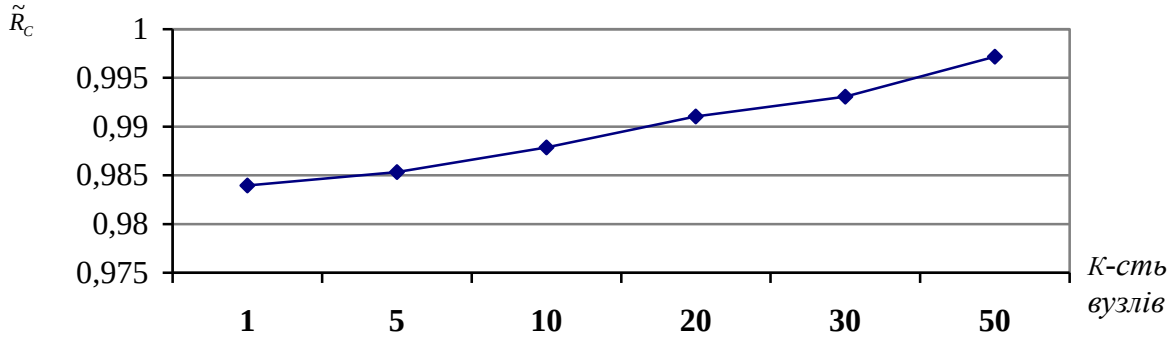


в) $t_B = 5 год$

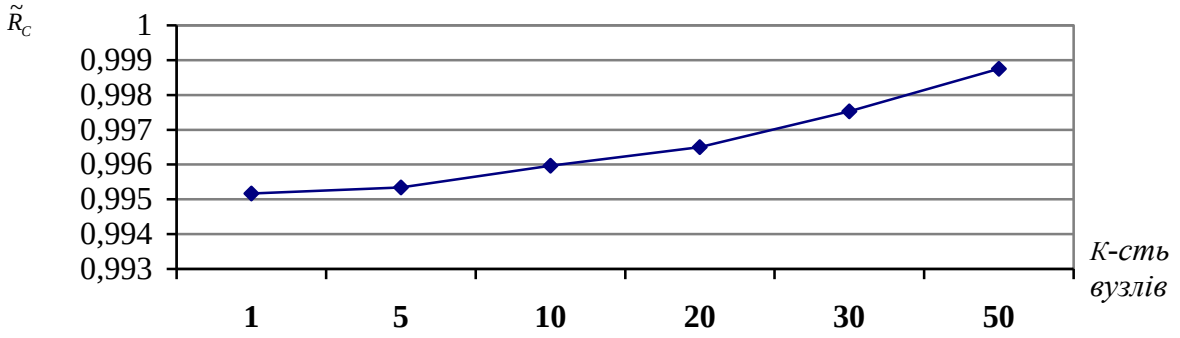
Рисунок 3.15 – Залежності коефіцієнта варіації наробітку до першої відмови системи від кількості вузлів



а) $t_B = 50 год,\ t_н = 3000 год$



б) $t_B = 10 год,\ t_н = 7000 год$



в) $t_B = 5 год,\ t_н = 10000 год$

Рисунок 3.16 – Залежності ЙБР системи від кількості вузлів

Підсумки дослідження

1. Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити такі висновки:

- середній наробіток до першої відмови квазімісткової структури інтенсивно зростає зі зменшенням часу відновлення і має тенденцію до збільшення з ростом кількості вузлів при фіксованому часі відновлення;

- ймовірність безвідмовної роботи квазімісткової структури зростає зі зменшенням часу відновлення і також зростає при збільшенні кількості вузлів;

- коефіцієнт варіації наробітку до першої відмови квазімісткової структури знижується зі зменшенням часу відновлення і зростанням кількості вузлів.

2. Середній наробіток до першої відмови відновлюваної структури при досить великому часі відновлення, наприклад, при = 50 год, перевищує аналогічний показник невідновлюваної структури, що складається, наприклад, з 10 вузлів, у 6 разів.

3. При подальшому зростанні часу відновлення понад 50 год величина середнього наробітку до першої відмови асимптотично сходиться з величиною середнього наробітку до відмови невідновлюваної структури.

4. При збільшенні кількості вузлів тенденція зменшення коефіцієнта варіації наробітку до першої відмови є додатковим фактором, що впливає на зростання ймовірності безвідмовної роботи [102] відновлюваної структури.

5. З ростом кількості вузлів зменшується складність елементів структури (ФСБ), що спрощує програмну і/або технічну реалізацію ССВК, підвищує точність контролю і діагностики несправностей структури і, як наслідок, приводить до зменшення часу відновлення і зростання показників надійності квазімісткової структури в цілому.

6. Таким чином, у цілому надійність квазімісткової структури з відновленням збільшується зі зростанням кількості вузлів.

7. Виявлений позитивний ефект від розбиття системи на рівнонадійні дубльовані вузли та використання реконфігурації структури у випадку відмови складових частин дозволяє розробнику з успіхом використовувати КМС як повністю відмовостійку, так і відмовобезпечну. КМС характеризується більш високим рівнем відмовостійкості і, як наслідок, живучості, так як має значно більшу кількість працездатних станів, ніж звичайна дубльована структура.

3.3 Дослідження достовірності функціонування КМС

Як відомо, відмови і збої у процесі функціонування керуючих КС призводять до виникнення помилок, які стають причиною порушень цілісності даних, виникнення помилкових обчислень, зниження готовності системи, а також непередбачуваної поведінки системи, що може спричинити тяжкі наслідки.

Цей фактор є особливо небезпечним для систем критичного застосування, у складі яких знаходять застосування різноманітні КС. Висока ефективність функціонування таких систем повинна бути досягнута шляхом реалізації стійких алгоритмів обчислень, ефективних методів контролю і відновлення працездатності поряд з використанням різноманітних методів забезпечення високої безвідмовності і відмовостійкості. Одним із таких шляхів є підвищення рівня достовірності функціонування КС критичного призначення [103].

Визначення 3.2. Достовірність функціонування КС визначається ймовірністю того, що значення параметра, який обчислюється та відображається інформацією або керуючим впливом, виробленим КС, відрізняється від істинного значення цього параметра в межах необхідної точності.

Для надлишкових відмовостійких КС не спостерігається прямої залежності, рівня надійності функціонування та достовірності інформації, що обробляється, або керуючих впливів на керовані об'єкти. Тому, необхідним є встановлення аналітичної залежності достовірності функціонування КС від типу структури і її характеристик.

При розгляді функціонування КС різних структур, для яких як показник достовірності будемо використовувати ймовірність отримання достовірного результату в ході проведення обчислень (обробки даних) [23].

Розглянуті КС функціонують за жорсткими, заздалегідь відомими алгоритмами і здійснюють періодичну обробку (накопичуваної) інформації, що надходить із видачею необхідної інформації.

Припущення 3.1. Всі канали рівнонадійні, моменти виникнення відмов (збоїв) відповідають *DN*-розподілу.

Припущення 3.2. Органи відновлення абсолютно надійні, і їх елементоємність набагато менше елементоємності каналу.

Достовірність функціонування КС за час t пропонується обчислювати за допомогою феноменологічної моделі:

$$D = [d_M \cdot {}_c^f R_s^q] \cdot k\,, \tag{3.4}$$

де d_M – достовірність обчислень модуля - умовна ймовірність того, що значення яке обчислюється модулем визначального параметра π, відрізняється від істинного значення цього параметра в межах необхідної точності (π – визначальний параметр – критерій правильного функціонування модуля), ${}_c^f R_s^q$ – ймовірність безвідмовної роботи системи за час t; k – коефіцієнт, що враховує кратність порівняння інформації між каналами у процесі функціонування системи або поріг порівняння послідовно включеного дорівнюючого пристрою.

Примітка 3.3. Для дубльованих структур з ВО, які реалізують функцію АБО, порівняння інформації між каналами не проводиться, тому k приймаємо рівним достовірності обчислень ненадлишкового модуля $k = d_M$. Для КМС порівняння інформації між каналами проводиться на виході кожного вузла, тому для КМС двома вузлами $k = 2d_M - d_M^2$, для КМС з трьома вузлами $k = 6d_M^2 - 5d_M^3$ і т.д. У загальному вигляді значення коефіцієнта k знаходиться з виразу $k = 1 - (1 - d_M)^n$, де n- кратність порівняння інформації між каналами у процесі функціонування системи або поріг порівняння послідовно включеного дорівнюючого пристрою.

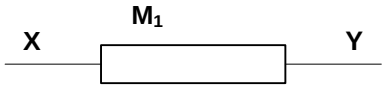
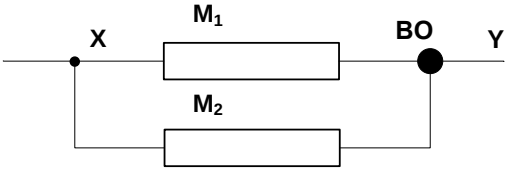
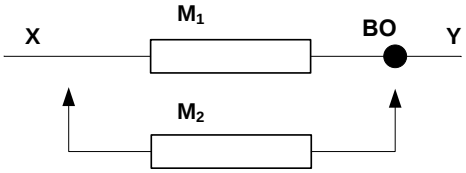
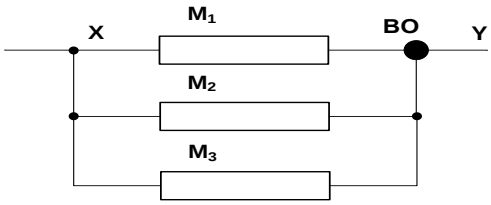
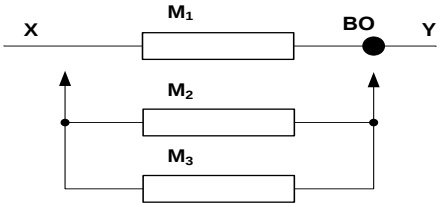
Перелік типів структур систем наведено в табл. 3.5.

Для кожної з розглянутих структур можна порівняти запис базової моделі безвідмовності типу ймовірність безвідмовної роботи системи у вигляді – ${}_c^f R_s^q$.

Ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкої системи ${}_c^f R_s^q$ обчислюється за формулою (1.1) [104]:

$${}_c^f R_s^q = c^s (1 - {}^f F_s^q)\,. \tag{3.5}$$

Таблиця 3.5 – Класифікація типів конфігурацій систем

Клас	Підклас	Позначення структурної схеми надійності системи	Базова модель $\,{}_{c}^{f}R_{s}^{q}$
I		 Ненадлишковий канал	$\,{}_{0}^{f}R_{0}^{1}$
II		 Навантажений резерв	$\,{}_{1}^{f}R_{1}^{1}$
	IIa	 Ненавантажений резерв	$\,{}_{c}^{f}R_{1}^{1}$
III		 Навантажений резерв	$\,{}_{1}^{f}R_{2}^{1}$
	IIIa	 Ненавантажений резерв	$\,{}_{c}^{f}R_{2}^{1}$

Приклад 3.8. Обчислити $\,{}_{c}^{f}R_{s}^{q}$ двоканальної (n=2) невідновлювальної системи IIa класу з навантаженим («гарячим») резервом (рис. 3.19) для таких вихідних даних:

– час експлуатації (напрацювання) $t = 200 \div$;

– середній наробіток до відмови функціонального модуля $T_M = 1000 \div$;

– коефіцієнт варіації наробітку до відмови функціонального модуля $V_M = 1{,}0$.

На рисунку системи рис. 3.17 модуль M_1 умовно назвемо основним, а модуль M_2 – резервним. Спочатку доступним для підключення є 1 модуль, тому s=1. Модулі працюють одночасно. Роботою системи управляє відновлюючий орган (ВО) з логічною функцією АБО, який визначає несправний модуль і маскує його, виключаючи, таким чином, його вплив на достовірність роботи системи в цілому.

Рисунок 3.17 – Структурна схема двоканальної невідновлювальної системи з навантаженим резервом

Продуктивність даної системи не залежить від кількості одночасно працюючих модулів, тому q=1.

У зв'язку з тим, що заміна основного модуля на справний резервний модуль здійснюється автоматично, без втрати даних, то c=1.

Припустимо, що модулі системи є ненадлишковими (див. Примітку 3.4), тому f=0.

Оцінка базової моделі безвідмовності для різних класів систем у рамках гіпотези про DN-розподілі напрацювання до відмови має вигляд

$$ {}^{f}_{c}R^{q}_{s} = c^{s}(1 - {}^{f}F^{q}_{s}) = c^{s}[1 - DN(x; v, f, q, s)] . $$

Обчислимо середній наробіток до відмови системи ЙФ-методом.

Примітка 3.4. Цей метод дозволяє проводити розрахунок надійності об'єктів, які мають такі структурні схеми надійності (ССН), що представляють собою

послідовне, паралельне і різне поєднання послідовного і паралельного з'єднань складових частин:

ССН-1 - об'єкт складається з n паралельно з'єднаних однотипних елементів (навантажений, «гарячий» резерв). Відмова його настає в результаті відмови усіх n елементів;

ССН-2 - об'єкт містить r резервних елементів, які знаходяться в ненавантаженому («холодному») резерві до початку виконання ними функцій основного елемента;

ССН-3 - об'єкт складається з n паралельно з'єднаних однотипних елементів. При цьому мінімальне число працездатних елементів k (структура типу "k із n"), відмова об'єкта настає при відмові ($n-k+1$) елементів.

1. Обчислимо середній наробіток до відмови системи зі структурою ССН-1 (табл. 3.6). $T_1 = T_M\sqrt{n} = 1000\cdot\sqrt{2} = 1414\,год.$

Таблиця 3.6 – Попередні оцінки надійності типових ССН

Тип структури	Параметр форми *DN*-розподілу, ν	Середній наробіток до відмови системи, T_1
ССН-1	$V_M n^{-1/2}$	$T_M n^{1/2}$
ССН-2	$V_M/\sqrt{r+1}$	$T_M(r+1)$
ССН-3	$V_M(n-k+1)^{-1/2}$	$\frac{T_M(n-k+1)}{n^{1/2}}$

2. Обчислимо величину відносного напрацювання $x: x = \frac{t}{T_1} = \frac{200}{1414} = 0{,}14$.

3. Обчислимо параметр форми *DN*-розподілу: $\nu = \frac{V_M}{\sqrt{n}} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} = \frac{1}{1{,}41} = 0{,}7.$

4. За таблицею DN-розподілу для значення ν=0,7 обчислимо ймовірність відмови: ${}^0F_1^1 = 0{,}00092$.

5. Обчислюємо базову модель безвідмовності: ${}_1^0R_1^1 = c^s(1-{}^0F_1^1) = 1^2(1-0{,}00092) = 0{,}99908$.

Приклад 3.9. Обчислимо ${}_c^fR_s^q$ двоканальної дубльованої (n=2) невідновлювальної системи IIа класу з ненавантаженим («холодним») резервом (рис. 3.18) для вихідних даних прикладу 1.

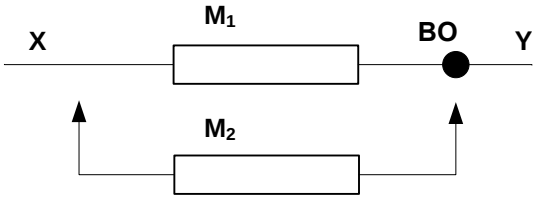


Рисунок 3.18 – Структурна схема двоканальної невідновлюваної системи з ненавантаженим резервом

На рисунку системи (рис. 3.18) модуль M_1 умовно назвемо основним, а модуль M_2 – резервним. Спочатку доступним для підключення є 1 модуль, тому s=1. Резервний модуль знаходився у справному стані на момент початку експлуатації системи і чекав своєї черги з вимкненим електроживленням. Роботою системи управляє ВО з логічною функцією АБО, який визначає несправний модуль і маскує його виключаючи його вплив на достовірність роботи системи в цілому.

Продуктивність даної системи не залежить від кількості одночасно працюючих модулів, тому q=1.

Заміна основного модуля на справний резервний модуль здійснюється автоматично, проте, оскільки резервний модуль знаходиться в ненавантаженому резерві, то при заміні основного модуля, що вийшов з ладу, необхідно буде перевантажити дані з основного модуля на резервний, повернувши обчислення на крок назад. В результаті цієї процедури можливі втрата деяких даних і простій у роботі системи, тому величина повинна бути менше 1, наприклад, c=0,95.

Модулі системи є також ненадлишковими, тому f=0.

1. Обчислимо середній наробіток до відмови системи зі структурою ССН-2 (табл. 3.7): $T_1 = T_M(r+1) = 1000 \cdot 2 = 2000$ *год.*

2. Обчислимо величину відносного напрацювання $x: x = \frac{t}{T_1} = \frac{200}{2000} = 0{,}1$.

3. Обчислимо параметр форми *DN*-розподілу: $\nu = V_M \big/ \sqrt{r+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}7$

4. За таблицею DN-розподілу для найближчого до розрахункового значення ν =0,7 обчислимо ймовірність відмови: ${}^0F_1^1 = 0{,}00004$.

5. Обчислюємо базову модель безвідмовності:

$$ {}_{0,95}^{\;0}R_1^1 = c^s(1 - {}^0F_1^1) = 0{,}95^1(1 - 0{,}00004) = 0{,}949962 . $$

Приклад 3.9. Обчислимо ${}_c^f R_s^q$ двоканальної невідновлювальної КМС з двома вузлами (рис. 3.19) для вихідних даних прикладу 1.

Для створення КМС розіб'ємо модуль, який використовується в дубльованих структурах, на два рівнонадійних модуля та створимо два дубльованих вузла.

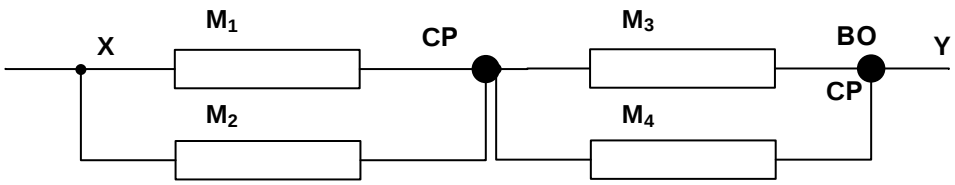


Рисунок 3.19 – Структурна схема надійності (ССН) КМС з двома вузлами

1. Обчислимо середній наробіток до відмови модулів КМС (M_1, M_2, M_3, M_4) із двохвузловою структурою: $T_{M1-4} = T_M\sqrt{n} = 1000 \cdot \sqrt{2} = 1414\,год.$

2. Обчислимо середній наробіток до відмови вузлів КМС (B_1,B_2) із двохвузловою структурою: $T_{B1-2} = T_{M1-4}\sqrt{n} = 1414 \cdot \sqrt{2} = 1999\,год.$

3. Обчислимо величину відносного напрацювання вузла $x: x = \frac{t}{T_{B1-2}} = \frac{200}{1999} = 0{,}1$.

4. Обчислимо параметр форми *DN*-розподілу для вузла: $\nu = \frac{V_i}{\sqrt{n}} = \frac{V_i}{\sqrt{2}} = \frac{1}{1{,}41}$ =0,7.

5. За таблицею DN-розподілу для значення ν=0,7 обчислимо ймовірність відмови вузла: ${}^{0}F_{1}^{1} = 0{,}00004$.

6. Обчислюємо базову модель безвідмовності вузла системи:

$$ {}_{1}^{0}R_{1}^{1} = c^{s}(1-{}^{0}F_{1}^{1}) = 1^{1}(1-0{,}00004) = 0{,}99996 . $$

Оскільки КМС представляє собою структуру І-го класу, яка містить у собі дві двоканальні дубльовані структури з «гарячим» резервом, що послідовно підключені через СР за логічною функцією АБО (диз'юнкція, $\vee$), то ймовірність безвідмовної роботи такої КМС обчислюється так: $R_{КМС}$=${}_{1}^{0}R_{1}^{1}\cdot{}_{1}^{0}R_{1}^{1} = 0{,}99996^{2} \approx 0{,}99992$.

Примітка 3.5. У загальному вигляді СР КМС має змінну логічну функцію І/АБО, однак для аналізу надійності КМС по її ССН приймаємо функцію СР як функцію АБО.

Результати обчислення достовірності функціонування КС наведені нижче.

1. Дубльована невідновлювана структура з навантаженим резервом ІІ класу, при $d_{\grave{i}}$ =0,995 та ${}_{c}^{f}R_{s}^{q}$=0,99908 за час t обчислимо за формулою (3.26)

$$ D = [d_{M}\cdot{}_{c}^{f}R_{s}^{q}]\cdot k = 0{,}995\cdot 0{,}99908\cdot 0{,}995 = 0{,}989. $$

2. Дубльована невідновлювана структура с ненавантаженим резервом ІІа класу, при d_{M}=0,995 та ${}_{c}^{f}R_{s}^{q}$=0,94996 за час t обчислимо $D = [d_{M}\cdot{}_{c}^{f}R_{s}^{q}]\cdot k = 0{,}995\cdot 0{,}94996\cdot 0{,}995 = 0{,}94$.

3. Двоканальна невідновлювана КМС із двох вузлів, при $d_{\grave{i}}$ =0,995, $k = 2d_{M} - d_{M}^{2}$=0,999975 та ${}_{c}^{f}R_{s}^{q}$=0,99992 за час t обчислимо $D = [d_{M}\cdot{}_{c}^{f}R_{s}^{q}]\cdot k = 0{,}995\cdot 0{,}99992\cdot 0{,}999975 = 0{,}9949$.

Проаналізуємо отримані нами результати оцінки достовірності функціонування КС у залежності від типу структури системи (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Порівняльна характеристика достовірності функціонування різних структур

Тип структури	T_1,	${}_c^f R_s^q$	c	k	D
Дубльована з навантаженим резервом	1414	0,99908	1,0	0,995	0,989
Дубльована з ненавантаженим резервом	2000	0,949962	0,95	0,995	0,94
КМС	2000	0,99992	1,0	0,99997	0,9949

Підсумки дослідження

1. Порівняємо характеристики структур, дубльовану структуру з ненавантаженим резервом ${}^0F_1^1 = 0{,}00004$ і дубльовану структуру з навантаженим резервом ${}^0F_2^1 = 0{,}00092$. Очевидно, що дубльована структура, при її економічній реалізації, не на багато поступається за ймовірністю відмови. А з точки зору базової моделі відмовостійких структур ${}_c^f R_s^q$ (ймовірності безвідмовної роботи), дубльована структура з ненавантаженим резервом значно програє дубльованій структурі з навантаженим резервом. Це пов'язано з тим, що структура в резерві має ненавантажений модуль, підключення якого пов'язане із простоєм системи і можливістю втрати даних. Це також визначає відносно низьку достовірність функціонування дубльованої структури з ненавантаженим резервом D=0,94.

2. КМС демонструє ще більш високі показники ймовірності безвідмовної роботи і достовірність функціонування.

3. Виходячи з аналізу запропонованої моделі, вирішальний внесок має параметр c, який входить до складу базової моделі ${}_c^f R_s^q$.

Степінь компенсації c являє собою умовну ймовірність того, що при виникненні відмови у працюючій системі вона (система) здатна відновити втрачену інформацію і продовжити її обробку без тривалої втрати працездатності.

У деяких ситуаціях відновлення може означати тільки виявлення, локалізацію і функцію автоматичного виправлення апаратної відмови, в інших ситуаціях воно може включати, також дуже складну реставрацію виконаних обчислень і бази даних. Природно, що в першому випадку c вище, ніж у другому.

Для структур II, III класів величина c наближається до 1 і обмежується лише діагностичними і комутаційними можливостями ВО і його надійністю. Для структур підкласів II і III величина c значно нижче, тому що ймовірність втрати інформації при ненавантаженому («холодному») резервуванні досить висока.

Характеристику c можливо змінити шляхом додавання додаткового контрольно-діагностичного обладнання до кожного модуля і довести до значення, близького 1, при цьому апаратна надійність модуля зменшиться. Для отримання більш достовірної оцінки c необхідно провести аналіз діагностичних і комутаційних можливостей ВО і обчислити його ймовірність безвідмовної роботи R_{BO}. При цьому завжди матиме місце нерівність $c \le R_{BO}$.

Кожен раз, коли ступінь компенсації c виявляється недостатньо високою, додавання розумної кількості додаткового обладнання для підвищення c є в цілому ефективним. І той факт, що кожен індивідуальний модуль стає менш надійним через залучення додаткового обладнання, є менш вирішальним, ніж збільшення ступеня компенсації c.

Для систем, які повинні працювати з високим рівнем безвідмовності протягом тривалого часу, відновлення працездатності за рахунок резерву має найбільший потенціал. Однак розрахунки показують, що c, визначена як ймовірність відновлення системи після відмови, є найважливішою характеристикою безвідмовної системи. Зміна c від 1 до 0,98 та нижче може привзести до зниження безвідмовності системи на кілька порядків (приклад 2).

4. Підвищення безвідмовності системи шляхом нерозумного додавання резервних модулів є менш ефективним у порівнянні з напрямом, заснованим на підвищенні ступеня компенсації. Додавання контрольних перевірок, діагностик, дзеркального копіювання, свопинга і т.п. для збільшення ступеня компенсації є найбільш переважним. Точна оцінка c є досить складним завданням і вимагає залучення методів моделювання на всіх етапах проектування системи.

3.4 Висновки до розділу 3

Для проведення досліджень надійності запропонованої КМС розроблено методи аналітичного розрахунку і статистичного моделювання засобами пакета програм RELIABmod, показано її переваги з боку надійності перед класичною дубльованою структурою. Доведено, що КМС дозволяє підвищити безвідмовність і експлуатаційну готовність за рахунок декомпозиції (дихотомії) складових частин (ФБ) на рівнонадійні частини (ФСБ) з додаванням схем контролю та реконфігурації.

1. Порівняльна оцінка надійності із класичною дубльованою структурою демонструє виграш у плані ймовірності безвідмовної роботи (0,996 проти 0,99). Завдяки поблочному резервуванню і реконфігурації, система набуває властивостей відмовостійкості та підвищення готовності.

2. Розрахунки, проведені логіко-ймовірнісним методом, ЙФ-методом та методом заснованим на класичних теоремах теорії ймовірності, також демонструють переваги КМС у ймовірності безвідмовної роботи порівняно з іншими структурами зі змішаним резервуванням.

Аналіз залежності ймовірності безвідмовної роботи КМС від кількості дубльованих вузлів ЙФ-методом показав, що з ростом кількості вузлів у КМС відзначається зростання ймовірності безвідмовної роботи структури. Ймовірність безвідмовної роботи КМС з 2 і 3 вузлами перевищує ймовірність безвідмовної роботи класичної дубльованої структури. Найбільший виграш за ймовірністю безвідмовної роботи КМС досягається при рівності надійності ФСБ і дубльованих вузлів.

3. Аналіз отриманих результатів моделювання відновлювальної КМС дозволяє зробити такі висновки:

- середній наробіток до першої відмови квазімісткової структури інтенсивно зростає зі зменшенням часу відновлення і має невелику тенденцію до збільшення з ростом кількості вузлів при фіксованому часі відновлення;

- ймовірність безвідмовної роботи квазімісткової структури зростає зі зменшенням часу відновлення і також зростає при збільшенні кількості вузлів;

- коефіцієнт варіації наробітку до першої відмови квазімісткової структури знижується зі зменшенням часу відновлення і зростанням кількості вузлів.

Статистичне моделювання надійності продемонструвало, що надійність квазімісткової структури з відновленням збільшується зі зростанням кількості вузлів.

4. Оцінювання достовірності функціонування КМС з використанням оригінальної феноменологічної моделі також демонструє її переваги перед іншими двоканальними резервованими структурами.

Основні результати розділу опубліковані автором у роботах [3, 8, 10, 17, 23, 24].

РОЗДІЛ 4
ГАРАНТОЗДАТНА МІКРОПРОЦЕСОРНА КОНТРОЛЬНО-ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕЇЗДІВ «БЛАГОВІСТ»

4.1 Інформаційний підхід до забезпечення безпеки на залізничних переїздах

Рішення проблеми аварійності на залізничних переїздах вимагає концентрації зусиль фахівців у сфері залізничного, автомобільного і дорожнього господарств та їх підрозділів, а також дорожньо-патрульної служби. Успіх справи залежить також від активної позиції науки у вирішенні цієї проблеми, від розробки і реалізації сучасних технічних рішень в області попередження аварійності на переїздах. Робота в цьому напрямі повинна вестися з урахуванням різних умов експлуатації переїздів, а точніше – з урахуванням підвищення інтенсивності руху транспортних засобів на тій чи іншій ділянці автомобільних доріг і залізничних колій [2, 9, 12-14,16, 22, 31, 105-109].

Яскравим прикладом підвищення безпеки руху через пішохідні переходи, за рахунок інформованості учасників руху в місті, є встановлені інформаційні табло, що показують час, який залишився до включення зеленого сигналу світлофора для автотранспортного засобу (АТЗ) і заборони руху пішоходів через пішохідний перехід. На деяких пішохідних переходах додатково з відліком часу вмикається акустичний супровід для людей із вадами зору. Дослідженнями встановлено, що саме така, відносно недорога, інформаційна система дозволяє скоротити кількість дорожніх пригод із вини пішоходів більш, ніж на 60%.

Аналізуючи статистику аварій на переїздах [114-116], причинами яких є об'їзди автомобілями автоматичних шлагбаумів (АШ) або виїзди на колії перед поїздом у випадку, коли переїзд не обладнано АШ, неминуче виникає питання: «Чи сталася б така аварія, якби водій АТЗ знав, звідки наближається поїзд, з якою швидкістю він рухається і скільки доведеться чекати, поки відкриється переїзд?». Відповідаючи на це питання, можна впевнено стверджувати: якби водій мав

вичерпну інформацію про короткий час, який потрібно зачекати, та велику швидкість поїзду, що слідує в його напрямку, то у нього вистачило б терпіння дочекатися відкриття переїзду. Опитування учасників дорожнього руху залізничними переїздами показало, що майже 70% водіїв автотранспорту підтримують ідею підвищення їх інформованості щодо поїзної ситуації в зоні переїзду. Дана ідея знайшла підтримку не тільки серед водіїв, а й Департаменту ДАІ МВС України, а також в Національному транспортному університеті (м. Київ) (Додаток А, п. А3, А4). Її перспективність відзначено Національною академією наук України, Департаментом автоматики, телемеханіки та зв’язку Укрзалізниці, Державним науково-дослідним центром залізничного транспорту України, дирекцією міністерства інфраструктури залізних доріг Грузії (Додаток А, п. А.1, А2, А.5).

Основною перевагою такого підходу [14, 16] на залізничному транспорті є такі переваги контрольно-інформаційної системи для залізничних переїздів (КІСЗП):

• вони є відносно недорогими сучасними засобами, що дозволяють підвищити безпеку руху АТЗ через переїзди;

• вони є автономними, не вимагають схемного зв’язку з діючими системами автоматичної переїзної сигналізації (АПС) ;

• можуть встановлюватися на будь-яких типах переїздів і при будь-яких видах тяги і системах АПС;

• на них не поширюються вимоги щодо функціональної безпеки, які пред'являються до систем залізничної автоматики і пов'язані з забезпеченням безпеки руху поїздів.

Усі перелічені ознаки дають можливість широкого впровадження цих систем на залізничному транспорті України та за кордоном.

Проаналізувавши існуючі зразки систем АПС [107-109, 107-114], які використовуються на залізничних переїздах в України та за кордоном, було сформовано вимоги, яким повинна задовільняти сучасна контрольно-інформаційна система.

Основні функції:

1. Своєчасне інформування водіїв АТЗ з використанням інформаційного табло про дорожню ситуацію в зоні переїзду, зокрема: зайнятість ділянки наближення до переїзду; напрямок руху поїзда, швидкість руху поїзда, час до проходження поїзда через переїзд (зворотний відлік з урахуванням змінної швидкості руху поїзда), звільнення ділянки наближення до переїзду, інші попередження учасників руху у вигляді інформаційного рядка, що біжить.

2. Контрольована швидкість руху поїзда до 200 км/год і вище.

3. Межа дальності контролю руху поїзда до 2,5 км.

4. Відстань надійного сприйняття відеоінформації від 1 до 50 м.

5. Температура навколишнього середовища експлуатації від - 30 С до + 60 С.

6. Автономне електроживлення від акумуляторної батареї з підзарядкою від сонячної батареї або від промислової мережі змінного струму частотою 50 Гц і напругою 220 В.

7. Використання сучасних матеріалів та технологій енергозбереженння (електроенергія, кабельна продукція та ін.).

8. Волого-, вібро- і антивандальну стійкість виконання обладнання.

9. Самоконтроль працездатності і автоматичний перехід у захисний стан при відмові апаратури.

10. Можливість експлуатації на переїздах будь-яких наявних типів і при будь-яких видах тяги.

Додаткові функції:

1. Об'єктивний апаратний контроль вільності зони переїзду і формування попереджувальної інформації про аварійну ситуацію на переїзді на табло.

2. Відеоспостереження та відеозапис стану зони переїзду під час руху поїзда.

3. Передача інформації про аварійну ситуацію на переїзді в систему диспетчерського контролю (СДК) і службу Міністерства надзвичайних ситуацій.

В межах Конкурсу науково-технічних проектів наукових установ НАН України в ІПММС НАН України розроблено експериментальний зразок КІСЗП «Благовіст».

4.2 Структурна схема КІС

Структура центрального пункту

Зовнішній вигляд КІСЗП встановленої на переїзді (рис. 4.1) представляє собою комплекс апаратури, що встановлена на переїзді, до якої підключаються два інформаційних табло, по одному з кожної сторони переїзду.

Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд КІСЗП встановленої на переїзді

У модифікації для одноколійного шляху із двостороннім рухом КІСЗП «Благовіст» (рис. 4.2) [13, 14, 22] складається з центрального пункту (ЦП), що знаходиться безпосередньо на переїзді, та двох лічильних пунктів (ЛП), що знаходяться на віддаленні від переїзду.

Інформування водіїв транспортних засобів та пішоходів на переїзді про наближення поїзда, час, що залишився до його прослідування через переїзд та швидкості і напрямку руху. Інформаційні табло повинні встановлюватися поблизу переїзду з кожного боку в зоні прямої видимості для водіїв АТЗ.

ЦП може бути розташований в типовій підлоговій шафі в зоні переїзду спільно з обладнанням системи залізничної автоматики, в індивідуальній спеціальній шафі або в корпусі інформаційного табло.

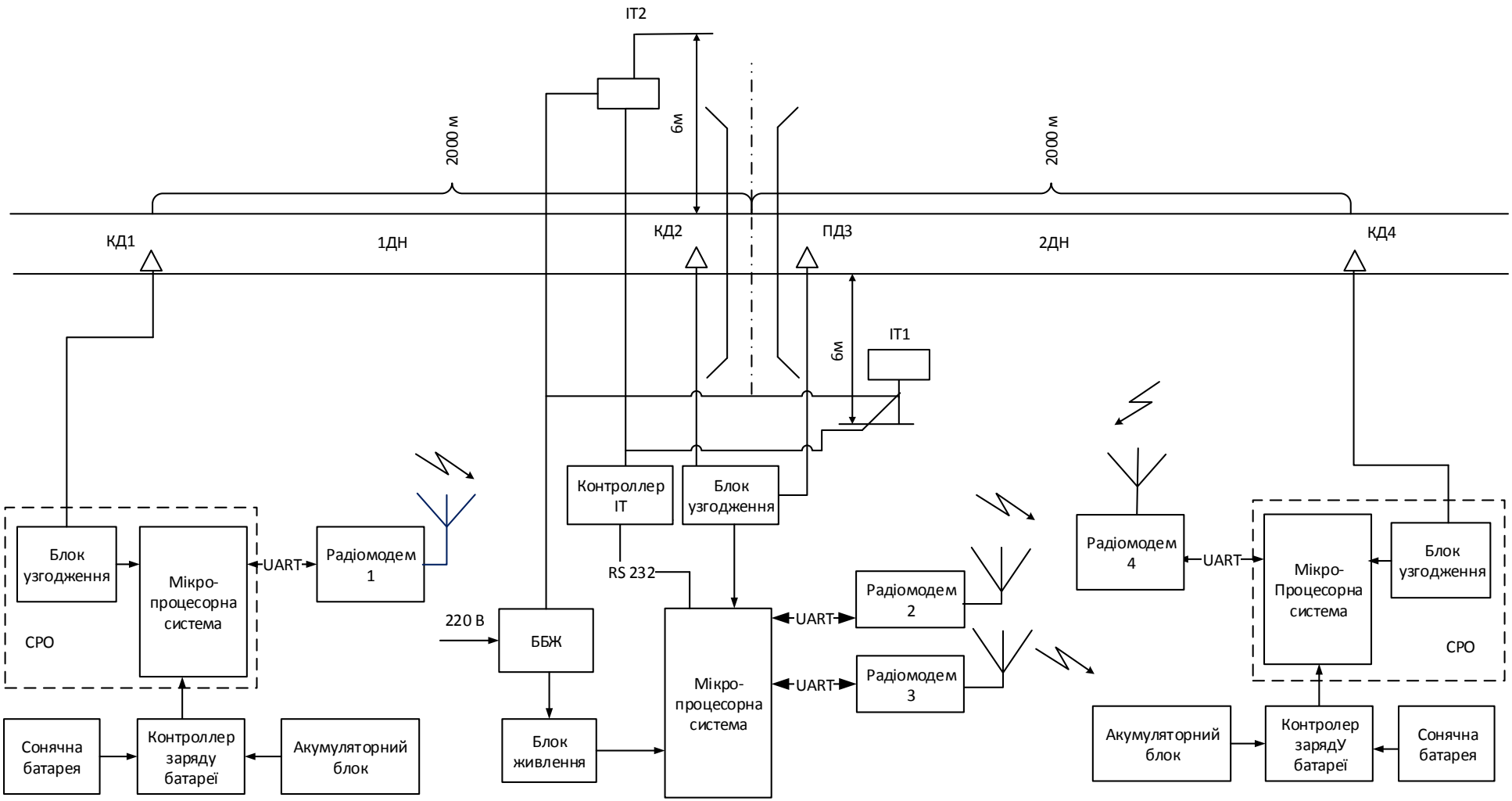


Рисунок 4.2 – Структурна схема КІСЗП «Благовіст»

ЦП обладнано блоком безперебійного живлення, що дозволяє продовжувати роботу системи при збоях та короткотривалому відключенні живлення (близько 30 хв.).

Структурна схема мікропроцесорної системи центрального пункту зображена на рис. 4.3.

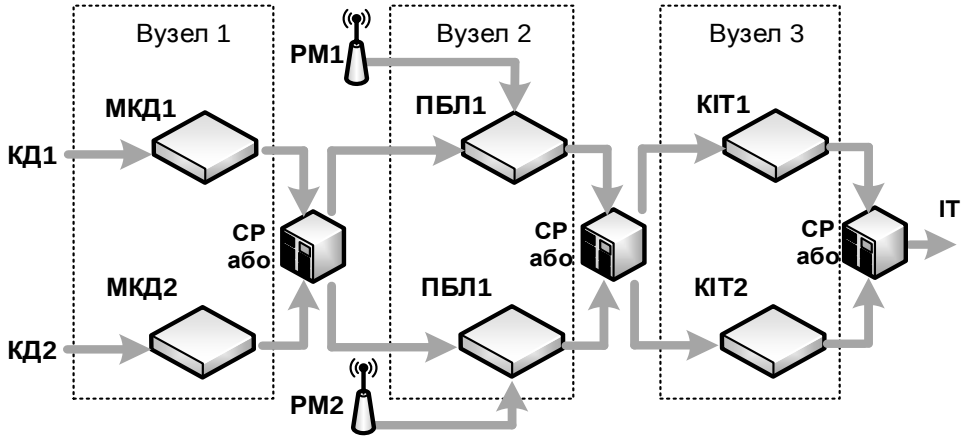


Рисунок 4.3 – Структурна схема мікропроцесорної системи ЦП

Для забезпечення відмовостійкості та підвищеної готовності мікропроцесорна система центрального пункту КІСЗП «Благовіст» організована за принципом КМС, що складається із 3-х вузлів.

Вузел 1 містить два мікроконролера датчиків (МКД), що отримують інформацію від колійних датчиків ДПД-03. Окрім програми обробки сигналів, на базі МКД реалізовано програму перевірки та відновлення у випадку збою. Також передбачено, що перевірка та відновлення конролера датчика може здійснюватися процесором блока логіки (ПБЛ).

Вузел 2 складається із двох паралельно сполучених ПБЛ на основі кожного з яких виконуються обчислення алгоритму роботи системи. ПБЛ також отримує інформацію від усіх ЛП через радіоканал завдяки радіомодему (РМ). Кожний процесор обчислює основні логічні функції керування роботою системи за двома різними алгоритмами. У разі неспівпадіння результатів здійснюється його перезапуск у межах вузла 2.

Вузел 3 складається з 2-х контроллерів інформаційних табло (КІТ), що формують сигнали команд на інформаційні табло. На базі кожного контролера

реалізовано контрольне тестування, за результатами якого приймається рішення про наявність помилки в обчислювальному каналі. У випадку виявлення помилки контролер здійснює перезавантаження.

Така схема надає можливість здійснювати контроль працездатності та відстеження помилок обчислень, а також здійснювати реконфігурацію структури з метою забезпечення стійкості до помилок та відмов.

Структура лічильного пункту

До складу лічильного пункту (рис. 4.5) входять колійний датчик, мікропроцесорна система підрахунку осей (СПО), РМ прийому-передачі, блок узгодження, контролер заряду акумулятора, акумулятор, антена, сонячна батарея.

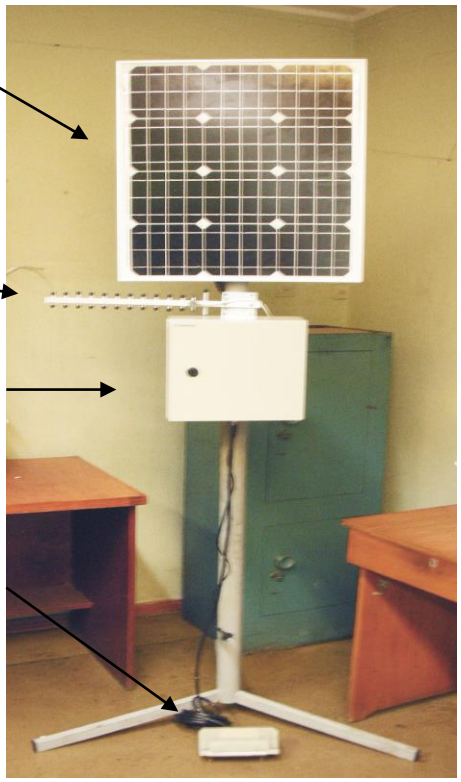


Рисунок 4.4 – Центральний пункт Рисунок 4.5 – Лічильний пункт

Лічильний пункт забезпечує відстеження руху поїзда, що проходить у зоні контролю колійних датчиків, методом підрахунку числа осей визначення швидкості

кожної осі поїзда, визначення напрямку руху поїзда, передачу інформації через радіоканал зв'язку на ЦП.

ЛП розташовується в металевій шафі на типовій щоглі, що використовується для світлофорів, на якій також встановлюються антена і панелі сонячної батареї (в залежності від виду електроживлення системи).

ЛП розміщуються на віддаленні від переїзду ($L_{розр.}$, п.2.4.), що забезпечує безпечний час сповіщення ($T_{спов}$, п.2.4) учасників руху на переїзді. ЛП має автономне електроживлення від акумуляторної батареї з підзарядкою від сонячної батареї (СБ). У випадку, коли існує можливість підключення до джерела струму 220В, ЛП комплектується джерелом безперебійного живлення, що працює сумісно з живленням від СБ. До ЛП може підключатися декілька СБ для збільшення запасу живлення. При підключенні декількох СБ також здійснюється дублювання контролерів СБ для безперебійного живлення у разі відмови СБ, або контроллера СБ.Колійні датчики як найбільш енергоспоживні мають можливість бути переведеними в режим сну, а під час руху поїзда активуються за допомогою датчика вібрації, що встановлюється в корпусі основного колійного датчика проходження колеса поїзда. Таким чином досягається підвищена енергозбереженість ЛП.

За аналогією з мікропроцесорною системою ЦП, мікропроцесорна система ЛП також побудована на основі відмовостійкої КМС структури і має такий вид (рис. 4.6).

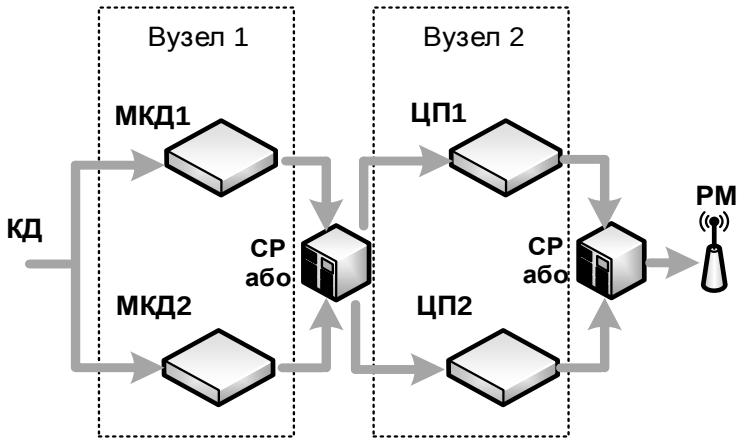


Рисунок 4.6 – Структурна схема мікропроцессорної системи ЛП

Вузел 1 містить два мікроконролера датчиків (МКД) ДПД-03, на базі яких реалізовано програму перевірки, реконфігурації та відновлення у випадку збою.

Передбачено, що перевірка, реконфігурація та відновлення конролера датчика може здійснюватися центральними процесорами (ЦП1, ЦП2).

Вузел 2 складається із двох паралельно сполучених процессорів (ЦП1, ЦП2), на основі кожного з яких виконуються підрахунок осей поїзду та обчислення його швидкості. Кожний процесор здійснює обчислення за двома різними алгоритмами, у випадку не співпадіння результатів здійснюються його перезапуск та реконфігурація в межах ФБ 2.

4.3 Елементний базис КІС

Детальні характеристики базових складових компонентів КІСЗП «Благовіст» наведені в Додатку Е.

У системі використовуються колійні датчики проходження колеса вітчизняного виробництва ДПД-03 ТОВ «ДСКТБ СКАТ» (рис. 4.7).

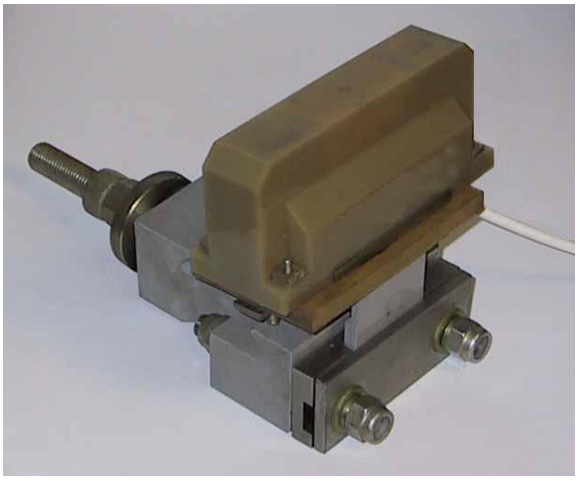


Рисунок 4.7 – Датчик проходу колеса ДПД-03

Ці датчики мають ряд переваг, перевірені в різних умовах експлуатації на магістральному транспорті в Україні й мають прийнятну вартість у порівнянні з закордонними аналогами. Датчики мають два електромагнітних чутливих елементи, які формують криву проходу колеса, що дозволяє фіксувати швидкість рухомого складу і напрямок його руху, а також здійснювати контроль цілісності ланцюгів живлення датчика.

Інформаційне табло виконується з урахуванням вимог вологозахисту ip67 і побудовано на базі понадяскравих світлодіодів марки Cree, що дозволяє досягти максимальної видимості на відстані (рис. 4.8).

Рисунок 4.8 – Приклад інформаційного табло з написами

4.4 Алгоритмічне забезпечення КІС

4.4.1 Логіка роботи ЛП

Використовуючи в конструкції системи колійні датчики магнітно-індукційного типу, які мають два чутливих елементи, підключених паралельно (канал 1, канал 2), і видають циклограму виду, як на рис.4.9, стає можливою подальша обробка отриманої інформації. Для цього, перетворюючи аналоговий сигнал у цифровий, проводиться його обробка за допомогою блока узгодження, що складається зі схеми формування базового рівня чутливості та відцифрування.

Отриманий сигнал обробляється мікропроцесорною системою ЛП [31], яка реєструє кількість імпульсів що відповідають кількості осей, та проводить їх підрахунок. Реєструючи перший вхідний імпульс із каналу 1, імпульс із каналу 2 та різницю в часі між ними (t_r), система ЛП за формулою (4.1) визначає швидкість осі поїзда V_{ps}. Для визначення швидкості і напрямку поїзда чутливі елементи КД рознесені на 125 мм (r).

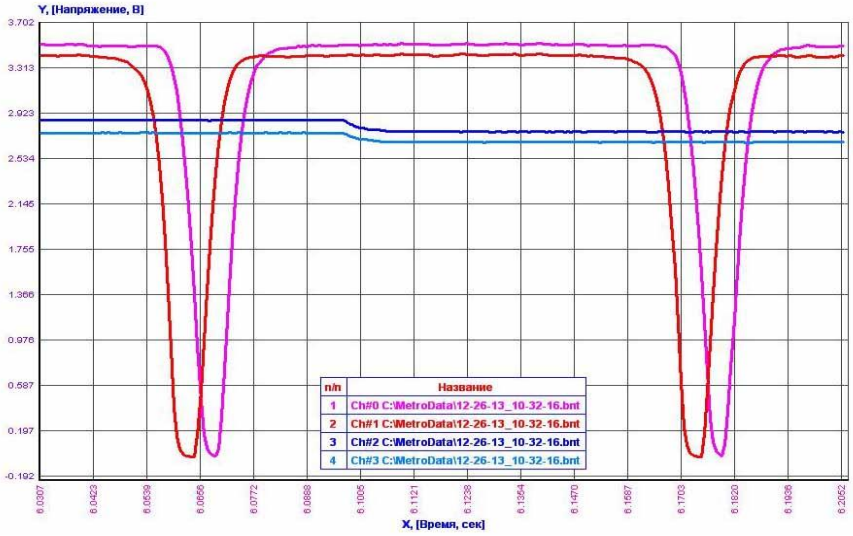


Рисунок 4.9 – Циклограма проходу колеса через КД

$$V_{ps} = \frac{r}{t_r}. \tag{4.1}$$

Після отримання значень швидкості не менше, ніж чотирьох осей, (мінімальна для основних типів поїздів), відбувається обчислення її середнього значення та передача його на ЦП. Якщо ЛП обчислює значення швидкості, яке значно відрізняється (хибне) від інших, таке значення не реєструється. Для підрахунку кількості осей при отриманні першого вхідного імпульсу система відкриває сесію рахунку осей та, згідно з умовою (4.2), визначає максимально допустимий час між імпульсами T_s (4.2). Коли час після останнього імпульсу перевищує розрахунковий час, то підрахунок осей закінчується, і дані про їх кількість передаються до ЦП.

Таким чином значення швидкості та напрямку руху поїзда передаються на ЦП майже відразу, а значення кількості осей – після прослідування поїзду через КД.

$$T_S = t_\tau \cdot K, \tag{4.2}$$

де K – коефіцієнт запасу часу для компенсації розбіжності при зміні інтервалів імпульсів у разі зміні швидкості та подовження часу сесії рахунку осей.

4.4.2 Логіка роботи ЦП

ЦП завжди знаходиться в активному режимі. Під активним режимом мається на увазі, що у будь-який час він готовий отримати та обробити сигнал, а всі його складові елементи знаходяться під напругою, РМ 2,3 знаходяться в режимі очікування сигналу від СП.

РМ1 сконфігуровано на прийом сигналу тільки від РМ2, а РМ3 – на прийом сигналу тільки від РМ4, таким чином, дані повідомлень, що приходять з ЛП ідентифікуються у однозначній відповідності з їх розташуванням на маршруті слідування поїзда.

Коли один із РМ ЦП фіксує повідомлення, наприклад, з КД1 від ЛП1 про напрямок руху та швидкість, починає працювати алгоритм обробки даних. Якщо напрямок руху вказує на наближення поїзда до зони переїзду, то згідно з інформацією про швидкість проводиться визначення часу зворотного відліку (4.3) згідно з закладеними даними про відстань r_{pd} від КД до ділянки перетину залізничного полотна (ЗП) і авторанспортної магістралі (АТМ).

Час, через який буде здійснюватися зворотний відлік на інформаційному табло (t_0) визначається (4.3), виходячи з швидкості поїзда і часу сповіщення.

$$t_0 = \frac{r_{pd}}{V_{ps}} - t_d, \tag{4.3}$$

де t_d - допустимий час закриття переїзду (не менше 40 с за вимогами до АПС); r_{pd}- відстань від ПД до ділянки перетину ЗП і АТМ.

Після обчислення часу зворотного відліку на інформаційному табло включається режим наближення поїзда.

Після отримання сигналу з КД3 на інформаційному табло включається режим проїзду смуги перетину поїзда. Після прийому сигналу від КД4 ЛП2 з даними про напрямок руху поїзда у напрямку віддалення від переїзду і даними про кількість осей, система проводить порівняння кількості осей поїзду на ЛП1 і ЛП2, у разі задоволення умови (4.4) на інформаційному табло включається режим вільного переїзду.

$$n_1 = n_2 \pm 1, \tag{4.4}$$

де n – кількість осей поїзду, зареєстрованих відповідним ЛП.

При поправці на ±1 вісь використовується для виключення помилки рахунку, так як при русі поїзду є неможливою ситуація при якій на ділянці може залишитися вагон з однією віссю, навіть у випадку ремонтних робіт.

У випадку, коли поїзд зупиняється на шляху прямування, не доїхавши до переїзду, система, чекаючи сигналу від КД3, не отримує його і значення швидкості має малий показник ($V_{ps}\rangle$ 5 км/год). Після закінчення часу зворотного відліку, продовжує очікування ще 30 с після чого переводить табло в режим зупинки потягу на шляху слідування. Режим залишається активним до моменту, коли буде активізований ДП2 або надійде сигнал від ЛП1 з даними про напрямок руху поїзда у бік від переїзду.

4.4.3 Режими роботи інформаційного табло

1. Режим вільного переїзду.

На табло відображається тільки рядок, що біжить: Дотримуйтесь правил руху!

2. Режим наближення поїзда:

Стрілки напрямку вказують напрямок руху поїзда.

Швидкість руху: значення швидкості руху (км / год).

Час наближення до переїзду: зворотний відлік часу до проходження поїзда.

Рядок, що біжить: Обережно, наближається поїзд!

3. Режим проїзду смуги перетину переїзда:

Стрілки напрямку вказують напрямок руху поїзда.

Швидкість руху: значення швидкості руху (км / год).

Рядок, що біжить: Рухається поїзд! Стрілки - згідно з напрямком руху.

4. Режим зупинки поїзда на шляху слідування:

Стрілки напрямку: вказівка напрямку руху поїзда.

Рядок, що біжить: Будьте уважні! На ділянці поїзд!

4.5 Програмне забезпечення КІС

Програмне забезпечення реалізує основні функції КІСЗП і керує роботою таких блоків:

Мікропроцесорна система інформаційного табло

Контролери ІТ забезпечують адресацію сигналів на світлодіоди, що надходять від мікропроцесорної системи ЦП. Для цього програмою мікроконтролера здійснюється декодування пакета посилки командного повідомлення з урахування контрольних сум. Програма котролера інформаційного табло написана на мові програмування асемблер (assembly language).

Мікропроцесорна система радіомодулів

Програмне забезпечення (ПЗ) радіомодулів відповідає за прийом/передачу данних через UART інтерфейс та дозволяє формувати, передавати/отримувати пакетні повідомлення у форматі АТ команд. ПЗ радіомодулів розроблено їх

виробником, конфірурування налаштувань модулів здійснюється сервісною програмою X-CTU.

Мікропроцесорна система лічильних пунктів

ПЗ ЛП відповідає за ідентифікацю сигналів колійних датчиків та її відцифрування. Здійснює підрахунок осей, визначення швидкості та напрямку руху поїзда, виконує підрахунок часу прослідування, формує пакети даних, що передаються на UART інтерфейс радіомодуля.

ПЗ ЛП являє собою программу, написану на мові програмування C++, зкомпільовану та завантажену до мікропроцесора ЛП.

Мікропроцесорна система центрального пункту

ПЗ ЦП відповідає за отримання інформації з UART інтерфейсу радіомодуля та її обробку. Програма співставляє інформацію про підрахунок осей, швидикість та напрямок руху поїзда, час прослідування від різних ЛП системи. На основі отриманих даних визначається об’єктивний стан, в якому знаходиться система, відповідно здійснюється формування інформаційних повідомлень, що передаються на інформаційні табло. ПЗ ЦП являє собою програму, написану на мові програмування C++, зкомпільовану та завантажену до мікропроцесора ЦП.

4.6 Методи забезпечення гарантоздатності КІС

Технічні та програмні засоби і алгоритм роботи системи розроблялися у відповідності зі стратегією відмовобезпеки [18, 19], заснованою на заміні реалізації дорогої повної відмовостійкості на реалізацію часткової відмовостійкості, названої відмовобезпекою, заснованою на виключенні небезпечних ситуацій, що спричинені КІСЗП, у справному і несправному станах. При моделюванні алгоритму системи, аналогічно до [14], проводився контроль працездатності алгоритму КІСЗП на недопущення небезпечних спотворень інформації на виході системи при виникненні відмов у процесі її роботи.

Збій у роботі КІСЗП може призвести до короткочасної помилки в розрахунку залишкового часу до моменту проходження поїздом переїзду, але така ситуація не є небезпечною, тому що внаслідок динамічного режиму роботи вона виправляється в наступному такті роботи системи.

Відмова системи теоретично може призвести до помилкової оцінки залишкового часу, внаслідок чого може бути видана неправдива інформація на електронне табло, причому видача більш тривалого проміжку часу є більш небезпечною, ніж видача скороченого.

У зв'язку з цим, була прийнята парадигма побудови гарантоздатної системи з негарантоздатних компонентів [46]. Будь-яку відмову системи слід вважати небезпечною, а вирішення проблеми безпеки необхідно вирішувати в рамках двоканальної КС, що організована у виді КМС. Також вирішення проблем безпеки здійснюється застосуванням алгоритмічних, програмних та інших засобів (динамічним режимом, автоматичним контролем, самодіагностикою та ін.).

У системі передбачений режим захисного стану (Protective State), при якому табло не працює або на нього виводиться попереджувальна інформація, яка дозволяє своєчасно повідомити водіїв автотранспорту про небезпеку. Обрана структура системи та її алгоритм функціонування дозволяють здійснювати об'єктивний контроль станів системи та ідентифікувати події відповідно до їх значимості щодо відмовобезпеки.

Методи забезпечення гарантоздатності застосовувалися відповідно до кожного атрибута гарантоздатної системи, що може бути застосований до розроблюваної КІСЗП [4].

Безвідмовність

Атрибут безвідмовність забезпечується використанням усього комплексу методів класичної теорії надійності, включаючи використання високонадійних сучасних елементів (мікроконтролерів, мікросхем і напівпровідникових приладів і т.п.), структурних методів резервування, методів інформаційної надмірності і кодування інформації. Використання в системі віброзахищенних колійних датчиків нового зразка з дубльованим чутливим елементом і можливістю контролю

електричних ланцюгів дозволяє здійснювати підрахунок осей з високим рівнем безвідмовності та відмовостійкості.

Готовність

Для забезпечення даного атрибута було здійснено ряд заходів, а саме: в системі здійснювався безперервний контроль ланцюгів чутливих елементів колійних датчиків, виконувався циклічне опитування каналу радіозв'язку та каналу з’язку з ІТ, проводився контроль заряду батареї блока безперебійного живлення, що позитивно позначилося на зниженні часу відновлення системи і підвищенні її коефіцієнта готовності.

Живучість

Для забезпечення даного атрибута в системі передбачено такі конструкційні рішення: датчики системи виконані в корпусах із міцної пластмаси для захисту від механічних пошкоджень при зовнішніх впливах; апаратура лічильних пунктів і центрального пункту розміщена в металевих шафах для захисту від несанкціонованого доступу і атмосферного впливу у разі несприятливих погодних умов; виконано дублювання КД, що дозволяє продовжувати роботу системи при відмовах їх елементів; реалізовано алгоритм контролю несправностей, при реалізації якого відстежуються відмови датчиків, модулів зв'язку, джерела безперебійного живлення, контролерів ІТ; застосовані гальванічні розв'язки обладнання для підвищення стійкості системи до стрибків напруги в ланцюгах живлення.

«Благовіст» як контрольно-інформаційна система є допоміжною системою існуючій АПС, дублює її інформаційні можливості, але значно розширює їх обсяги. Тому при виході зі строю однієї з вказаних систем безпека руху через залізничний переїзд буде відповідати вимогам його експлуатації на період часу до проведення технічного обслуговування або ремонту.

Достовірність

З метою підвищення рівня достовірності роботи системи виконується перевірка і здійснюється контроль:

• алгоритму роботи системи (система обчислює рішення за двома алгоритмами і приймає рішення тільки при співпадінні рішень);

• обчислення швидкості руху поїзду за двома джерелами даних (сигнали з різних чутливих елементів одного датчика і сигнал з різних датчиків, проводиться порівняння результатів);

• визначення напрямку руху поїзду (сигнали з різних чутливих елементів одного датчика і сигнал з різних датчиків, проводиться порівняння результатів).

У процесі роботи системи здійснюється багаторазова передача команд через радіоканал зв’язку від ЛП до ЦП. Для підвищення достовірності роботи системи здійснюється рахунок осей поїзду на вхідному і вихідному датчиках. При значному неспівпадінні результатів підрахунку система переводиться в захисний стан із видачею на табло попереджувальної інформації.

Обслуговуваність

Для забезпечення необхідного рівня обслуговуваності системи кожен блок системи забезпечений світловою індикацією, а саме:

• блок безперебійного живлення – індикатор включення і роботи в різних режимах;

• блок заряду акумулятора і режиму живлення – світлова індикація роботи в різних режимах (зарядка, помилка зарядки, рівень зарядження);

• обчислювальний блок ЛП – світлова індикація роботи в різних режимах, зв'язок з датчиками, спрацьовування датчиків, наявність живлення;

• радіопередавачі – світлова індикація включення і роботи в різних режимах, індикатор наявності зв'язку між пристроями;

• інформаційне табло – вивід технічної інформації у вигляді кодів помилок.

Система має блочну конструкцію, всі блоки з'єднані роз'ємами і можуть бути оперативно замінені у випадку виходу з ладу.

Цілісність

Для забезпечення необхідного рівня цілісності системи використовуються такі технічні рішення:

• при передачі сигналів через провідний канал від центрального пункту до інформаційного табло використовується спеціально розроблений протокол, який включає в себе перевірку контрольних сум посилки;

• при передачі інформації через радіоканал використовується спеціальний внутрішній протокол зв'язку, який враховує механізми перевірки цілісності повідомлення (Integrity) і перевірки його справжності (Authentication).

Конфіденційність

Система даного типу є режимною, тобто має ручне управління, і контроль в ній може здійснюватися електромеханіком тільки при відкритті замку на шафі з обладнанням і підключенні спеціального сервісного комп'ютера. Оскільки в системі використовується радіозв'язок, для забезпечення атрибута конфіденційність передбачено шифрування даних, що передаються через радіоканал за допомогою алгоритму AES з довжиною ключа 128 біт.

Функціональна безпека

Для забезпечення атрибута функціональної безпеки в системі був проведений аналіз можливих несправностей і реакцій системи на них. Згідно з аналізом прийнято відповідні заходи при проектуванні. Наприклад, при відмовах колійних датчиків відслідковуються такі ситуації: відсутність сигналу, слабкий сигнал, помилковий сигнал.

Оскільки в системі для ідентифікації поїзду використовується дубльований каскад двоканальних КД, це рішення дозволяє при відмові одного датчика з пари, або одного з каналів кожного датчика переходити в режим, при якому система залишається працездатною. У цьому випадку розрахунок швидкості під час руху поїзда у напрямку датчика, що відмовив, не проводиться, а значення швидкості на інформаційному табло маскується максимально допустимим значенням швидкості для поїзду, що курсують на даній залізничній ділянці. В системі виділені стани, при яких проводиться її перехід у безпечний стан з повідомленням учасникам руху відповідної інформації на інформаційному табло.

4.7 Напрями майбутнього вдосконалення КІСЗП

Оскільки КІСЗП «Благовіст» розроблена на основі КС, вона має значні можливості для розширення інформаційних і керуючих можливостей. Прикладом такого розширення є КІСЗП «Благовіст 2.0», що розглянута в [14]. У новій версії «Благовіст 2.0» передбачено об'єктивний контроль стану переїзду за допомогою трьох датчиків переміщення, робота яких починається з моменту закриття переїзду. ЦП аналізує стан зони переїзду на предмет наявності АТЗ. Якщо небезпечна зона переїзду зайнята АТЗ, то система за допомогою сирени сповіщає оточуючих про аварійну ситуацію на переїзді, включає додаткове освітлення. КІСЗП «Благовіст 2.0» має можливість передачі: заборонного сигналу на попереджувальний переїзний світлофор; сигналу аварійної обстановки на переїзді поїзного диспетчера через канал зв'язку системи диспетчерського контролю; заборонного сигналу світлофора в кабіну машиніста кодами автоматичної локомотивної сигналізації за спеціальними шлейфами, що укладаються уздовж рейок.

Крім того, КІСЗП «Благовіст 2.0» передбачає встановлення відеокамери безперервного відеоспостереження за переїздом, що дозволяє передавати відеосигнал на ЦП і зберігати протокол відеоспостереження на цифровому носії з метою ідентифікації транспортних засобів, які порушили правила дорожнього руху через переїзд.

Також системи серії «Благовіст» можуть стати однією із складових частин щодо забезпечення безпеки на залізничних переїздах, при розвитку концепції GPS / GSM трекінгу залізничного транспорту [102] та інших сучасних перспективних комплексних системи підвищення безпеки руху через залізничні переїзди [115–123].

4.8 Висновки до розділу 4

Враховуючи високий рівень аварійності, низьку технічну оснащеність та недостатню інформованість учасників руху на залізничних переїздах.

1. Сформульовано інформаційний підхід до забезпечення безпеки залізничних переїздів, оснований на інформуванні учасників руху через залізничний переїзд про швидкість руху поїзду, напрям руху і час, що залишився до моменту його проходження через переїзд.

2. Для реалізації інформаційного підходу і з метою впровадження отриманих у дисертації результатів щодо створення гарантоздатних систем критичного призначення розроблено експериментальний зразок КІСЗП «Благовіст». Для забезпечення високого рівня безвідмовності, відмовостійкості, готовності й безпеки КІСЗП «Благовіст» реалізовано на основі КМС.

3. У рамках конкурсу науково-технічних проектів наукових установ НАН України в ІПММС НАН України, створено експериментальний зразок системи.

4. Проведено випробування експериментального зразка гарантоздатної КІСЗП «Благовіст» у Центрі випробувань і сертифікації технологій та засобів обчислювальної техніки та автоматизації при ІПММС НАН України, що підтвердило її високий рівень працездатності.

5. Значну перспективу та потенціал впровадження розробленої системи відзначено Національною академією наук України, Департаментом автоматики, телемеханіки і зв’язку Укрзалізниці та Державним науково-дослідним центром залізничного транспорту України (Додаток А, п. А.1, А.2). Виконання іноваційного проекту було підтримано Національним транспортним університетом (Додаток А, п. А.3). З дослідним зразком були ознайомлені представники департаменту ДАІ МВС України, які дали згоду на обладнання залізничних переїздів (Додаток А, п. А.4). Отримано дозвіл на встановлення дослідного зразка системи на залізничну магістральну ділянку залізних доріг Грузії (Додаток А, п. А.5).

Основні результати розділу опубліковані автором у роботах [2, 9, 12–14, 16, 22, 31].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі викладено рішення низки важливих завдань у теорії і практиці забезпечення гарантоздатності КС із двоканальною структурою обробки даних, а саме:

1. Вдосконалено АМГ КС та здійснено розгорнуту декомпозицію її понять на атрибути, метрики і критерії рівня реалізації, яка відрізняється від відомих включеним до її складу атрибуту достовірность, аналітичних оцінок кількісних метрик та критеріїв реалізації якісних метрик, що надає можливості дослідження й управління гарантоздатністю КС.

2. Вперше розроблено метод кількісного оцінювання атрибутів, метрик та критеріїв рівня реалізації, що дозволяє здійснити параметризацію АМГ. Завдяки цьому, розроблено скалярну математичну модель комплексного оцінювання загального рівня гарантоздатності КС та реалізовано процедуру порівняльної оцінки КС для різних варіантів їх реалізації. Такий метод, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати аналітичне оцінювання рівня гарантоздатності та робити вибір варіантів реалізації гарантоздатної КС при її інжинірингу.

3. Вперше на основі аналізу та класифікації відмовобезпечних структур КС із двоканальною структурою обробки даних запропоновано новий клас двоканальної КС із квазімістковою структурою та можливістю реконфігурації при відмовах її складових частин, що дозволяє створювати відмовобезпечі і відмовостійкі КС підвищеної надійності, безпеки і живучості з мінімальною надмірностю технічних засобів. Завдяки аналітичним розрахункам та статистичному моделюванню надійності КМС, показано переваги запропонованої структури з боку надійності та достовірності від 10 до 30 % перед класичною дубльованою структурою.

4. Дістала подальшого розвитку стратегія відмовобезпеки як альтернатива дорогої стратегії повної відмовостійкості при проектуванні гарантоздатних КС за рахунок встановлення критеріїв небезпечних відмов та захисних станів, які

використовуються при доказі безпеки КС і дозволяють створювати ефективні реалізації КС без втрати безпеки функціонування.

5. Набув подальшого розвитку метод інжинірингу безпечних КС критичного призначення з високим рівнем живучості на основі КМС кластерного типу, що дозволяє підвищити безпеку і живучість КС розподіленого типу з розвиненою топологією в декілька разів на прикладі систем протиаварійної автоматики ГЕС.

6. Розроблено методи аналітичного розрахунку і алгоритми статистичного моделювання надійності КМС, показано їх переваги з боку надійності і достовірності функціонування перед класичною дубльованою структурою. Доведено, що КМС дозволяють підвищити безвідмовность і експлуатаційну готовність існуючих двоканальних резервованих систем обробки даних шляхом декомпозиції їх дубльованих каналів на рівнонадійні вузли, об'єднані схемами контролю та реконфігурації.

7. Доведено, що безвідмовність КМС зростає зі збільшенням кількості дубльованих вузлів, з яких складається структура. З ростом кількості вузлів КМС зменшується складність вузлів, що спрощує програмну та/або технічну реалізацію схем внутрішнього контролю, підвищується точність діагностики несправностей структури, що призводить до зменшення часу відновлення та зростання показників надійності відновлювальних квазімісткових структур у цілому.

8. Запропоновано інформаційний підхід до забезпечення безпеки руху залізничними переїздами, оснований на інформуванні учасників руху про швидкість руху поїзду, напрям руху і час, що залишився до моменту його проходження через переїзд. Для реалізації цього підходу та з метою впровадження отриманих у дисертації результатів на основі КМС розроблено експериментальний зразок Контрольно-інформаційної системи для залізничних переїздів «Благовіст», що не має аналогів в Україні. Значну перспективу та потенціал впровадження розробленої системи відзначено Департаментом ДАІ МВС України, Департаментом Автоматики, телемеханіки та зв’язку «Укрзалізниці», Національним транспортним університетом та спеціалістами залізничного транспорту Грузії, Вірменії та Польщі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Муха Ар.А. Управление процессом разработки сложных технических систем и процессов, особенности применения FMEA-анализа. *Математичні машини і системи.* 2012. № 2. С. 168-176.

2. Муха Ар.А. Моделирование и разработка алгоритма работы АПС-РМПГ средствами пакета Matlab Similink+ Statefolw. *Молодий вчений*. 2014. № 5 (8). С. 10-14.

3. Муха Ар.А. К вопросу о живучести систем противоаварийной автоматики на гидроэлектрических станциях. *Молодий вчений*. 2018. № 3 (55). С. 399-405.

4. Муха Ар.А. Практические аспекты гарантоспособности контрольно-информационной системы для железнодорожных переездов «Благовест». *Математичні машини і системи*. 2018. № 4. С. 109-116.

5. Mukha Ar.A. Develoment of safety FPGA-based systems for automatic crossing signals for lavel crossing. *Strategy of Quality in Indastry and Education:* IX international conference (Varna, Bulgary, 2013). Varna, 2013. Vol. 1. P.345-346.

6. Муха Ар.А. Гарантоспособность компьютерных систем – способность предоставлять требуемые услуги с высоким уровнем доверия. *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища INUDECO 18:* тези доп. III міжнар. конф. (м. Славутич, 25-27 квітня 2018 р.). Славутич, 2018. С.258-265.

7. Федухин А.В., Муха Ар.А., Муха А.А. ПЛИС-системы как способ повышения отказоустойчивости информационно-управляющих комплексов. *Математичні машини і системи.* 2010. № 1. С. 198-204.

8. Федухин А.В., Муха Ар.А. К вопросу об аппаратной реализации избыточных структур. Резервирование цифровых функциональных блоков. *Математичні машини і системи.* 2010. № 2. С. 138-143.

9. Федухин А.В., Муха Ар.А. К вопросу об аппаратной реализации избыточных структур: резервированная двухканальная система с реконфигурацией.

Математичні машини і системи. 2010. № 4. С. 156-159.

10. Федухин А.В., Муха Ар.А. Имитационное моделирование отказоустойчивой резервированной двухканальной системы в интегрированной инструментальной среде Matlab Simulink. *Математичні машини і системи.* 2011. № 2. С. 178-181.

11. Федухин А.В., Муха Ар.А. Имитационное моделирование отказоустойчивой резервированной двухканальной системы в интегрированной инструментальной среде Matlab Simulink. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС -2010:* тези доп. 5-ої наук.-практ. конф. з міжнар. участю (м. Київ, 25-29 червня 2010 р.). Київ, 2010. С. 225-226.

12. Федухин А.В., Муха Ар.А. Структурный синтез отказоустойчивых компьютерных систем. *Актуальні питання розвитку технічних наук в умовах глобальної нестабільності:* тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 13-14 квітня 2013 р.). Київ, 2013. С. 61-64.

13. Федухин А.В., Гладков А.В., Муха Ар.А. Новый подход к автоматизации переездов на железнодорожном транспорте. *Математичні машини і системи.* 2011. № 3. С. 135-141.

14. Ґедз О.В., Муха Ар.А. Моделирование работы и отладка алгоритма функционирования контрольно-информационной системы для железнодорожных переездов «Благовест». *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС - 2016:* тези доп. 11-ої наук.-практ. конф. з міжнар. участю (м. Київ, 25-29 червня 2016 р.). Київ, 2016. С. 246-247.

15. Муха Ар.А., Пасько В.П. Структурный синтез отказоустойчивых компьютерных систем. *Математичні машини і системи.* 2013, № 2. С. 202-206.

16. Федухин А.В., Ярошенко В.Н., Сухомлин А.И., Сеспедес Гарсия Н. В., Муха Ар.А. К вопросу о сравнительной оценке гарантоспособных систем. *Математичні машини і системи.* 2014. № 1. С. 185-194.

17. Федухин А.В., Муха Ар.А. Радиомикропроцессорные информационные системы для железнодорожных переездов серии «Благовест». *Математичні машини і системи.* 2014. № 2. С. 137-141.

18. Федухин А.В., Муха Ар.А. Беспроводные микропроцессорные системы для железнодорожных переездов серии «Благовест». *Молодий вчений.* 2014. № 11. С. 16-19.

19. Федухин А.В., Ярошенко В.Н., Муха Ар.А. К вопросу о взаимосвязи величин метрик и их весов. *Математичні машини і системи.* 2015. № 3. С. 191-200.

20. Федухин А.В., Муха Ар.А. Беспроводные микропроцессорные системы для железнодорожных переездов серии «Благовест». *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* 2015. № 2. С. 1-5.

21. Федухин А.В., Муха Ар.А. Информационный подход к повышению безопасности движения по железнодорожным переездам. *Математичні машини і системи.* 2015. № 4. С. 145-151.

22. Федухин А.В., Пасько В.П., Муха Ар.А. К вопросу моделирования надежности, восстанавливаемой квазимостиковой структуры с учетом тренда параметров надежности составных частей. *Математичні машини і системи.* 2016. № 1. С. 158-167.

23. Федухин А.В., Муха Ар.А. Стратегия отказобезопасности как альтернатива полной отказоустойчивости при проектировании гарантоспособных компьютерных систем. Ч. 1. *Молодий вчений.* 2016. № 8 (35). С. 169-173.

24. Федухин А.В., Муха Ар.А. Стратегия отказобезопасности как альтернатива полной отказоустойчивости при проектировании гарантоспособных компьютерных систем. Ч. 2. *Молодий вчений*. 2016. № 10 (37). С. 23-27.

25. Федухин А.В., Муха Ар.А., Сеспедес Гарсия Н.В. Доказательство безопасности компьютерных систем. *Математичні машини і системи.* 2016. № 3. С. 93- 101.

26. Федухин А.В., Ярошенко В.Н., Муха Ар.А. О важных следствиях из формулы DN-распределения наработки до отказа. *Молодий вчений.* 2016. № 11 (38). С. 42-46.

27. Федухин А.В., Лутов С.Д., Сеспедес Гарсія Н.В., Ґедз О.В., Муха Ар.А. Система інформаційного сповіщення для залізничних переїздів «Благовіст». *Наука*

та Інновації. 2017. № 13 (2). С. 29-35; Fedukhin A.V., Lutov S.D., Cespedes Garcia N.V., Gedz A.V., Mukha Ar. A. Blagovist: Information Warning System for Railroad Crossings. *Science and Innovation.* 2017. N 13 (2). P. 27-32.

28. Федухин А.В., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. К вопросу о связи надежности и достоверности функционирования компьютерных систем. *Математичні машини і системи.* 2017. №. 2. С. 145-155.

29. Федухин А.В., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. К вопросу о надежности невосстанавливаемой системы с квазимостиковой структурой элементов. *Математичні машини і системи.* 2017. № 4. С. 160-168.

30. Федухин А.В., Муха Ар.А., Сеспедес Гарсия Н.В. Моделирование и аналитическая оценка надежности квазимостиковой структуры. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС -2017:* тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 25-29 червня 2017 р.). Чернігів, 2017. С. 282-288.

31. Федухин А.В., Муха Ар.А. Обеспечение живучести систем противоаварийной автоматики ГЭС. *Математичні машини і системи.* 2018. № 2. С. 169-194.

32. Федухин А.В., Стрельников В.П., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. Приближенная оценка надежности восстанавливаемых изделий на этапе эскизного проектирования. *Математичні машини і системи.* 2018. № 3. С. 149-155.

33. Public law 107–56—oct. 26, 2001. Uniting and strengthening America by providing appropriate tools required to intercept and obstruct terrorism (USA PATRIOT ACT). *Congressional record.* 2001. Vol. 147. P.4.

34. Avizienis A., Laprie J.-C. Dependable Computing: From Concepts to Application. *IEEE Trans. On Computers.* 1986. N 74 (5). P. 629-638.

35. Laprie J.-C. Dependability: Basic Concepts and Terminology, *Springer - Verlag,* 1992. P. 267.

36. Avizienis A., Laprie J.-C., Randell B., Landwehr C. Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. 2004. P. 11-33.

37. Avizienis A., Lnprie J.-C., Randell B. Fundamental Concepts of Dependability. *Technical Report: UCLA CSD Report no. 010028, LAAS Report №. 01-145, Newcastle Report N CS-TR-739*. 2002. P. 31.

38. Avizienis A. Toward Systematic Design of Fault-Tolerant Systems. *Arvutitehnika instituut. 1997.* Vol.1. P. 51-58.

39. Dobson J. E., Randell B. Building reliable secure computing systems out of unreliable insecure components. New Orleans. 1986. P. 10.

40. Avizienis A. The N. Version Approach to Fault-Tolerant Software. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1985. N 11 (12). P. 1491–1501.

41. IEC 60300-3-1. Dependability management. Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability. *Guide on methodology.* 2003. 126 p.

42. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. *Термины и определения.* Москва. 2015. С. 23.

43. Харченко В.С., Паршин В.В. Многоверсийные системы и обеспечение гарантоспособности. Х.: ИПмаш. 1989. 33 с. (Препринт №321).

44. Харченко В.С. Парадигмы и принципы гарантоспособных вычислений: состояние и перспективы развития. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* 2009. №2 (36). С. 91–100.

45. Харченко В.С. Гарантоспособность и гарантоспособные системы: элементы методологии. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2006. № 5 (17). С. 7–19.

46. Харченко В.С. Эволюция фон-неймановской парадигмы: Гарантоспособные системы из негарантоспособных компонет. *Системи обробки інформації.* 2007. Вип. 8(36). С. 11–19.

47. Харченко В.С. Гарантоспособность и гарантоспособные системы: элементы методологии. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* 2006. №5 (17). С. 7-19.

48. Ястребенецкий М.А., Васильченко В.Н., Харченко В.С. Информационно-управляющие системы АЭС: проблемы безопасности К.: Техника. 2004. 502 с.

49. Харченко В.С. Гарантоздатні системи та багатоверсійні обчислення: аспекти еволюції. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* 2009. №7 (41). С. 46–59.

50. Харченко В.С. Многоверсионные системы, технологии и проекты. Х.: НАКУ "ХАИ", Мин. образования и науки Украины, 2003. 528 с.

51. Харченко В.С. Теоретические основы дефектоустойчивых цифровых систем с версионной избыточностью. Х.: МОУ, 1996. 503 с.

52. Волковой А.В., Скляр В.В., Харченко В.С. Метод формирования моделей многоверсионного жизненного цикла для программных проектов. *ІКСЗТ.* 2004. № 2 (46). С. 40–44.

53. Gorbenko A., Kharchenko V., Popov P., Romanovsky A., Boyarchuk A. CS-TR: 863 Development of Dependable Web Services out of Undependable Web Components. *School of Computing Science, University of Newcastle.* Newcastle, UK, 2004. 36 p.

54. Харченко В.С. От безотказности электронных устройств к гарантоспособности web-систем. *Контрольно-измерительные приборы и автоматика.* 2004. № 9. С. 4–10.

55. Gorbenko A., Kharchenko V., Popov P., Romanovsky A. Dependable Composite Web Services with Components Upgraded Online. *Architecting Dependable Systems III, LNCS 3549 In R. de Lemos et al. Eds.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. P. 92 – 121.

56. Gorbenko A.V., Kharchenko V.S., Tarasyuk O.M. FMEA-technique of Web Services Analysis and Dependability Ensuring. *Proc. of the Workshop on Rigorous Engineering of Fault-Tolerant Systems (REFT'2005).* Newcastle, UK, 2005. P. 74–83.

57. Алексеєв Ю., Конорев Б., Скляр В., Одарущенко О., Харченко В., Чертков Г. СОУ-Н-НКАУ 0060:2010. Галузева система управління якістю. Гарантоздатність програмно-технічних комплексів критичного призначення**.** *Національне космічне агентство України. 2010. 61 с.*

58. Игнатов В.А., Гузий Н.Н., Сорая М.А. Метод расчета показателей гарантоспособности копьютерных сетей. *Проблеми інформатизації та управління.* 2011. № 2 (34). С. 58–63.

59. Федухин А.В. Оценка эффективности мультиустойчивых систем с учетом надежности их компонент. *Математические машины и системы.* 1999. № 1. С. 118–122.

60. Мудла Б.Г., Єфімова Т.І., Рудько Р.М. Гарантоздатність як фундаментальний узагальнений та інтегруючий підхід. *Математичні машини і системи.* 2010. № 2. С. 148-165.

61. Теслер Г.С. Концепция создания вычислительных средств с высоким уровнем отказоустойчивости. *Математичні машини і системи.* 2002. № 2. С. 176 – 183.

62. Теслер Г.С. Концепция построения гарантоспособных вычислительных систем. *Математичні машини і системи.* 2006. № 1. С. 134-145.

63. Теслер Г.С. Решение проблемы гарантоспособности компьютерных систем в аспекте базисов компьютерной науки. *Математичні машини і системи.* 2008. № 4. С. 171 – 188.

64. Федухин А.В., Мудла Б.Г. Гарантоспособность компьютерных систем – мода или объективная необходимость. *Математичні машини і системи.* 2014. №4. С. 179-188.

65. Eusgeld I., Freiling F.C. Introduction to Dependability Metrics. *Lecture Notes in Computer Science*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. Vol. 4909. 426 p.

66. Похлебаев С.М., Третьякова И.А. Атрибутивная модель понятия «материя» как методологическая основа построения и развития современной общенаучной картины мира. *Педагогические исследования.* 2005. № 4. С. 65-68.

67. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ, 1994. 96 с.

68. Кривуля Г.Ф., Шкиль А.С., Гаркуша Е.В. Готовность компьютеризированных систем управления и компетентность пользователя. *Інфомаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2011. № 5. С. 12-17.

69. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1978. 16 с.

70. Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. М.: Знание, 1987. 32 с.

71. Сербін В.Г., Сухомлин А.І. Визначення і формалізація основних показників гарантоздатності живучих комп'ютерних систем керування на основі ймовірносно-фізичного підходу для їх проектної оцінки і прогнозування. *Математичні машини і системи*. 2012. №4. С. 182-189.

72. ГОСТ 32.17—92. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Термины и определения. СПб.: ПИИТ, 1992. 33 с.

73. Сапожников В.В., Сапожников Вл. В., Талалаев В. И. Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики. М.: Транспорт, 1997. 288 с.

74. ITSEC (June 1991). Information Technology Security Evaluation Criteria (ITSEC): Preliminary Harmonised Criteria. Document COM(90) 314, Version 1.2. Commission of the European Communities. http://www.ssi.gouv.fr/site_documents/ITSEC/ITSEC-uk.pdf (access date: 2006-06-02).

75. Рекомендации по стандартизации «Информационные технологии. Основные термины и определения в области технической защиты информации» URL: http://tdocs.su/8446. (access date: 2018-03-11).

76. Ярошенко В. Н., Гарсия Н. В. Сеспедес, Ар. А. Муха. К вопросу об определении весов метрик некоторого атрибута гарантоспособности системы. *Математичні машини і системи*. 2014. № 4. С. 189–195.

77. Mayfield T., Roskos J. E., Welke S. R., Boone J. M. Integrity in automated information systems. *National Computer Security Center*. Alexandria, Virginia, USA, 1991. 130 p.

78. Johnson B.W. Fault-Tolerant Microprocessor-Based Systems. *IEEE Micro*. 1984. Vol. 4, N 6. P. 6–21.

79. Laprie J.C. Dependable Computing and Fault Tolerance: Concepts and Terminology. *Proceedings of 15th International Symposium on Fault-Tolerant Computing, Springer*. Vienna, 1985. Vol. 1. P. 2–11.

80. Avizienis A. Fault-Tolerant Systems. *IEEE Transactions on Computers*. 1976. 1985. Vol. 25, N 12. P. 1304-1312.

81. Сапожников В.В., Кравцов Ю.А., Сапожников Вл.В. Дискретные устройства железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. М.: Транспорт, 1988. 255 с.

82. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. О синтезе конечных автоматов с исключением опасных отказов. *Автоматика и телемеханика*. 1972. № 8. С. 93–99.

83. Graband M., Gunther H. Sichereits philosophie und Prufung. *Signal und Draht*. 1988. N 9. P. 199-204.

84. Лисенков В.М. Безопасность ответственных технологических процессов и технических средств на транспорте. *Автоматика, телемеханика и связь*. 1992. № 1. С. 8-11.

85. Сапожников В.В., Сапожников Вл. В., Христов Х.А., Гавзов Д.В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики. М.: Транспорт, 1995. 272 с.

86. Майерс Г. Надежность программного обеспечения. М.: Мир, 1980. 360 с.

87. Липаев В.В. Тестирование программ. М.: Радио и связь, 1986. 296 с.

88. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Талалаев В. И. Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики. М.: Транспорт, 1997. 288 с.

89. Харлап С.Н., Кочуров Д.С. Надежные программные реализации управляющих алгоритмов: учебно-методическое пособие по подготовке к лабораторным работам по дисциплинам “Программно-математическое обеспечение микропроцессорных систем” и “Микропроцессорные информационно-управляющие системы на транспорте”. Гомель: БелГУТ, 1999. 56 с.

90. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. К.: Логос, 2002. 486 с.

91. Зыбин С.В., Лихицкая И.В. Принципы и способы обеспечения живучести компьютерных систем. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку.* 2016. № 2 (42). С. 67-71.

92. Додонов О.Г., Кузнєцова М. Г., Горбачик О.С. Живучість складних систем: аналіз та моделювання: навч. посіб. у 2 ч. К.: НТУУ "КПІ", 2009. 262 с.

93. Брежнев Е.В., Харченко В.С. Методология обеспечения безопасности критических инфраструктур в условиях неопределенности: концепция и принципы. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2015. № 1 (71). С. 25-32.

94. Системы бесперебойного питания. URL:http://kolkata.all.biz/ru/kompaktnye-vzlety-g424543#.WN59UbjGzCM (дата обращения: 05.07.2017).

95. Федухин А.В. Синтез систем противоаварийной автоматики с исключением опасных отказов. *Математичні машини і системи.* 2017. №3. С. 139–153.

96. Федухин А.В. Гравитационная автоматика в системах защиты объектов критических инфраструктур. *Математичні машини і системи.* 2017. №1. С. 106–121.

97. Шишонок Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.Л. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М.: Советское радио, 1964. 551 с.

98. Половко А.М. Основы теории надежности. М.: Наука, 1964. 446 с.

99. Федухин А.В., Пасько В.П. Моделирование надежности систем средствами пакета программ RELIABmod. *Математичні машини і системи.* 2011. № 4. С. 176-182.

100. Повышение надежности за счет резервирования оборудования. URL: http://all-ht.ru/inf/systems/p_0_5.html, (Дата обращения: 12.02.2016).

101. Пасько В.П. Моделювання надійності невідновлювальної квазімісткової структури. *Математичні машини і системи.* 2013. № 1. С. 163 - 171.

102. Федухин А.В., Пасько В.П. Моделирование надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры с учетом тренда параметров надежности составных частей. *Математичні машини і системи.* 2014. № 3. С. 125-135.

103. Щербаков Н.С. Достоверность работы цифровых устройств. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.

104. Федухин А.В., Пасько В.П. К вопросу о количественных характеристиках безотказности избыточных компьютерных систем. *Математичні машини і системи.* 2012. № 1. С. 145-156.

105. РТМ 32 ЦШ 1115842.01 – 94. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Методы и принципы обеспечения безопасности микроэлектронных СЖАТ. М.: Транспорт, 1994. 115 с.

106. Переборов А.С., Брылеев А.М., Смирнова А.В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики. М.: Транспорт, 1984. 384 с.

107. Поздняков В.А., Тюпкин Ю.А. Безопасность на железнодорожных переездах. URL: http://www.css-rzd.ru/zdm/03-2000/00039.htm (дата обращения: 18.06.2017).

108. Соловьев А.Л., Чеблаков В.А., Петров А.Ф. Микропроцессорная переездная сигнализация с аппаратурой счета осей. *Автоматика, связь, информатика.* 2008. № 6. С. 2-10.

109. Sheikh S. M., Mahbub Md. H ., Khondker J. R., Gazi M. R. A Radio Based Intelligent Railway Grade Crossing System to Avoid Collision. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues,* 2010 Vol. 7, Issue 6. P.139-143.

110. Fitzpatrick K., Carlson J. A. Bean Traffic violations at gated highway-railroad grade crossings. *Texas transportation institute the texas a&m university system college station.* Texas, 1997. 105 p.

111. Rail Accident Investigation Branch, Department for Transport. Rail Accident Report. Investigation into the safety of automatic open level crossings on Network Rail's managed infrastructure. *Report 12/2011.* Derby, UK 2011. P. 60.

112. Mok S.C., Savage I. Why Has Safety Improved at Rail-Highway Grade Crossings. Risk Analysis. 2005. Vol. 25. P. 867–881.

113. Delmonte E., Tong S. Investigation into traffic delays at level crossing. *Transport Research Laboratory Final project report.* Berkshire, UK, 2008. P.73.

114. Surve1 S.V., Wamane S.S., Mhabadi S.H., Tagare M.N. PLC Based Automatic Railway Gate Controller and Obstacle Detector. *International Journal of Latest*

Trends in Engineering and Technology. Ratnagiri, Maharashtra, India, 2010. Vol. 9, Issue 3. P.133–139.

115. Pelz M., Eickmann C., Meyer M. Operational Requirements for Videobased Applications at Level Crossings. *Safer European Level Crossing Appraisal and Technology*. Marrakech, 2008. P.143–157.

116. Minnesota Department of Transportation Office of Traffic, Security and OperationsURS. Low-Cost Highway-Rail Intersection Active Warning System Field Operational Test. Evaluation Report. *Corporation and TranSmart Technologies, Inc.* Minnesota, 2005. P. 52.

117. Krishnamurthi K., Bobby M., Vidya V., Baby E. Sensor based automatic control of railway gates. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET).* Bangalore, India. 2015. Vol. 4, Issue 2. P.539–543.

118. Al-Zuhairi M.A. Automatic Railway Gate and Crossing Control based Sensors & Microcontroller. *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT).* Mustansiriya, India. 2013. Vol. 4, Issue 7. P. 2135–2140.

119. Pwint H.N., Tun Z.M., Tun H.M. Automatic Railway Gate Control System Using Microcontroller, International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR). 2014. Vol. 3. P. 1547–1551.

120. Aguado M., Jacob E., Saiz P., Unzilla J.J., Higuero M. V., Matias J. Railway signaling systems and new trends in wireless data communication. *VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference.* Dallas, TX, USA, 2005. P. 1333-1336.

121. Jeong Y., Nam C.S., Jeong H.J., Shin D. Train Auto Control System based on OSGi. *International Conference on Advanced Communication Technology*. 2008. P.276-279.

122. Charles Z.K. Chen, H. Hsiao How to Make Railroad Level Crossings Safer and Smarter. *White paper Moxa*. Dallas, TX, USA 2013. 10 p.

123. Cho B.K., Jung J.I. A Study on Intelligent Railway Level Crossing System for Accident Prevention. *International Journal of Railway*. 2010. Vol. 3, N 3. P. 106–112.

ДОДАТКИ

Додаток А

Акти з впровадження

А.1 Лист Департаменту автоматики, телемеханіки та зв'язку Укрзалізниці

ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ
УКРЗАЛІЗНИЦЯ
ДЕПАРТАМЕНТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ
вул. Тверська, 5, м. Київ-150, МСП 03680, тел.: (44) 465-05-00, 465-05-24; факс (44) 465-05-17

18.02.2015 № ЦШ - 14/71

В Президію Національної академії наук України
м. Київ, вул. Володимирська, 46

Про участь в конкурсі інноваційних проектів

На лист від 16.02.2015 № 148/7-5 Департамент автоматики, телемеханіки і зв'язку Державної адміністрації залізничного транспорту України підтримує актуальність питання підвищення безпеки руху на залізничних переїздах та не заперечує проти співпраці в питаннях розробки вимог, організації та проведенні випробувань дослідного зразка інформаційної системи при виконанні проекту «**Контрольно-інформаційна система для залізничних переїздів «Благовіст»**, у разі його включення до реалізації спільно з Інститутом проблем математичних машин і систем НАН України.

Начальник Департаменту О.А.Бунчуков

Сусідко, 465 05 14

000536

А.2 Договір про науково-технічне співробітництво з ДП «ДНДЦ УЗ»

ДОГОВІР 5/86-15
про науково-технічне співробітництво

м. Київ «26» 06 2015 р.

Ми, що нижче підписалися, державне підприємство «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України (надалі **ДП «ДНДЦ УЗ»**) в особі голови комісії з реорганізації - в.о. директора **Самсонкіна В.М.**, що діє на підставі наказу ДНДЦ УЗ від 14.07.2014 р. № 275 та Статуту, з однієї сторони, та Інститут проблем математичних машин і систем НАН України (надалі **ІПММС НАН України**) в особі директора **Морозова А.О.**, що діє на підставі Статуту, з іншої сторони, уклали цей Договір про наступне:

1. Предмет Договору:

1.1. **ДП «ДНДЦ УЗ» та ІПММС НАН України** в порядку та на умовах, що визначені цим договором, домовилися про співробітництво в рамках розроблення і проектування **ІПММС НАН України** контрольно-інформаційної системи для залізничних переїздів «Благовіст».

2. ДП «ДНДЦ УЗ»:

2.1. Формулює вимоги до нового класу сучасних контрольно-інформаційних систем для залізничних переїздів (КІСЗП), які на додаток до існуючих систем автоматичної переїзної сигналізації (АПС) здатні підвищити безпеку руху автотранспорту по залізничних переїздах.

2.2. Надає рекомендації щодо вибору типів складових частин КІСЗП, які дозволено до застосування на залізничному транспорті України.

2.3. За зверненням ІПММС НАН України бере участь у проведенні випробувань дослідного зразку КІСЗП.

2.4. Надає рекомендації про доцільність подальшого впровадження розробки на залізничному транспорті України.

3. ІПММС НАН України:

3.1. Розробляє дослідний зразок КІСЗП.

3.2. Розробляє Програму випробувань дослідного зразку КІСЗП.

3.3. Сумісно з ДП ДНДЦ УЗ проводить випробування дослідного зразку КІСЗП.

3.4. Складає підсумковий звіт про виконання робіт за проектом КІСЗП «Благовіст».

4. Роботи, передбачені цим Договором, не несуть фінансових зобов'язань для Сторін.

5. При виникненні необхідності виконання робіт, пов'язаних з фінансовими витратами для участі у проведенні випробувань дослідного зразку КІСЗП, ІПММС

НАН України виділяє ДНДЦ УЗ грошові кошти, про що оформлюється окрема додаткова угода до цього Договору.

6. Цей Договір укладений у двох примірниках по одному для кожної із Сторін та набирає чинності з моменту його підписання.

7. Договір набирає чинність з моменту підписання та діє до 31 грудня 2015 р.

Інститут проблем математичних машин і систем НАН України

03680, м. Київ-680,
пр-т Академіка Глушкова, 42
р/р 35210001009914 в ГУ ДКСУ у м. Києві, МФО 820019,
ЄДРПОУ 05417503,

ІПН 054175026503

Директор

_____ **А.О.Морозов**

МП

ДП «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України»
03038, м. Київ, вул. Івана Федорова, 39

р/р26007300533392 в АТ «Ощадбанк» м. Києва, МФО 322669,
ЄДРПОУ 31604528,
св-во платника ПДВ № 100094006,
ІПН 316045226051

Голова комісії з реорганізації – в.о. директора

_____ **В.М.Самсонкін**

МП

А.3 Лист Департаменту ДАІ МВС України

МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ДЕПАРТАМЕНТ ДЕРЖАВНОЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ІНСПЕКЦІЇ
вул. Лук'янівська, 62, м. Київ, 01071 тел. (044) 272-3660, ф. (044) 272-5774
www.sai.mia.gov.ua

09 червня 2015 року № 4/7- 2150 На № 7-17 від 05.06.2015

Інститут проблем
математичних машин і систем
НАН України
просп. Академіка Глушкова, 42,
м. Київ, 03680

Департаментом ДАІ МВС України в межах компетенції опрацьовано листа щодо визначення доцільності впровадження розробленого Інститутом проблем математичних машин і систем НАН України науково-технічного проекту «Контрольно-інформаційна система для залізничних переїздів «Благовіст»» (далі – КІСЗП «Благовіст»).

Інформуємо, що Департамент ДАІ МВС України не заперечує щодо обладнання залізничних переїздів дослідними зразками КІСЗП «Благовіст».

Т.в.о. начальника **М.І. Фасовий**

Котула Р.М. 374-1022

ІПММС АН України
Вх. № 7/53
11. 06 2015

А.4 Лист Національного транспортного університету

088768

УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

01 010, Київ, вул. Суворова, 1, т.ф. +38 (044) 280 8203, т. +38 (044) 280 8765, e-mail: general@ntu.edu.ua

15.06.15 № 1488/13

на № _____

В Президію Національної
академії Наук України

м. Київ, вул. Володимирська, 46

Про виконання
інноваційних проектів

Відповідно до Розпорядження Президії Національної академії наук України №35 від 28.01.15 р. про проведення конкурсу науково-технічних проектів наукових установ НАН України у 2015 р. Національний транспортний університет підтримує виконання Інститутом проблем математичних машин і систем інноваційного проекту «Контрольно-інформаційна система для залізничних переїздів «Благовіст».

З повагою,
перший проректор
проректор з наукової роботи **М.М. Дмитрієв**

Вик. Шпиг А.Ю.
280-20-77

А.5 Лист міністерства інфраструктури Грузії

სს „საქართველოს რკინიგზა"
GEORGIAN RAILWAY

10.11.2016
201 „ ——— " ———
№ 6235

Институт проблем математических машин и систем
Директору г-ну Морозову А.А.

Уважаемый господин Морозов А.А!

Внимательно ознакомились с содержанием письма и рассмотрели представленную систему (КИСЖП, „Благовест"), которая положительно одобрена в связи с возможной интеграцией на железной дороге.

На Грузинской Железной дороге имеется практика внедрения новых технологий в режиме установки тестирования. Надеемся на Ваше согласие на установку и включение в эксплуатацию в режиме тестирования указанной аппаратуры, после чего произойдет предварительный выбор переезда, где Вами будет смонтирована данная система и будет производиться наблюдение.

На основе практической работы и анализа будет принято решение о приобретении указанной системы.

С уважением,

Директор инфраструктуры Хорава В.

ISO 9001:2008 Corporate Governance Level

8 042609

სს „საქართველოს რკინიგზა"
"GEORGIAN RAILWAY" JSC
www.railway.ge

0112 თბილისი თამარ მეფის გამზირი 15.
15 Tamar Mepe avenue Tbilisi 0112

219-88-00, 219-95-67
219-91-59
Telfax: 219-91-51

Додаток Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Муха Ар.А. Управление процессом разработки сложных технических систем и процессов, особенности применения FMEA-анализа. *Математичні машини і системи.* 2012. №2. С. 168–176.

2. Муха Ар.А. Моделирование и разработка алгоритма работы АПС-РМПГ средствами пакета Matlab Similink+ Statefolw. *Молодий вчений*. 2014. № 5 (8). С. 10–14.

3. Муха Ар.А. К вопросу о живучести систем противоаварийной автоматики на гидроэлектрических станциях. *Молодий вчений*. 2018. № 3 (55). С. 399–405.

4. Муха Ар.А. Практические аспекты гарантоспособности контрольно-информационной системы для железнодорожных переездов «Благовест». *Математичні машини і системи*. 2018. № 4. С. 109–116.

5. Федухин А.В., Муха Ар.А., Муха А.А. ПЛИС-системы как способ повышения отказоустойчивости информационно-управляющих комплексов. *Математичні машини і системи.* 2010. № 1. С. 198–204.

6. Федухин А.В., Муха Ар.А. К вопросу об аппаратной реализации избыточных структур. Резервирование цифровых функциональных блоков. *Математичні машини і системи.* 2010. № 2. С. 138–143.

7. Федухин А.В., Муха Ар.А. К вопросу об аппаратной реализации избыточных структур: резервированная двухканальная система с реконфигурацией. *Математичні машини і системи.* 2010. № 4. С. 156–159.

8. Федухин А.В., Муха Ар.А. Имитационное моделирование отказоустойчивой резервированной двухканальной системы в интегрированной инструментальной среде Matlab Simulink. *Математичні машини і системи.* 2011. № 2. С. 178–181.

9. Федухин А.В., Гладков А.В., Муха Ар.А. Новый подход к автоматизации переездов на железнодорожном транспорте. *Математичні машини і системи.* 2011. № 3. С. 135–141.

10. Муха Ар.А., Пасько В.П. Структурный синтез отказоустойчивых компьютерных систем. *Математичні машини і системи.* 2013, № 2. С. 202-206.

11. Федухин А.В., Ярошенко В.Н., Сухомлин А.И., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. К вопросу о сравнительной оценке гарантоспособных систем. *Математичні машини і системи.* 2014. № 1. С. 185–194.

12. Федухин А.В., Муха Ар.А. Радиомикропроцессорные информационные системы для железнодорожных переездов серии «Благовест». *Математичні машини і системи.* 2014. № 2. С. 137–141.

13. Федухин А.В., Муха Ар.А. Беспроводные микропроцессорные системы для железнодорожных переездов серии «Благовест». *Молодий вчений.* 2014. № 11. С. 16–19.

14. Федухин А.В., Муха Ар.А. Беспроводные микропроцессорные системы для железнодорожных переездов серии «Благовест». *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* 2015. № 2. С. 1–5.

15. Федухин А.В., Ярошенко В.Н., Муха Ар.А. К вопросу о взаимосвязи величин метрик и их весов. *Математичні машини і системи.* 2015. № 3. С. 191–200.

16. Федухин А.В., Муха Ар.А. Информационный подход к повышению безопасности движения по железнодорожным переездам. *Математичні машини і системи.* 2015. № 4. С. 145–151.

17. Федухин А.В., Пасько В.П., Муха Ар.А. К вопросу моделирования надежности, восстанавливаемой квазимостиковой структуры с учетом тренда параметров надежности составных частей. *Математичні машини і системи.* 2016. № 1. С. 158–167.

18. Федухин А.В., Муха Ар.А. Стратегия отказобезопасности как альтернатива полной отказоустойчивости при проектировании гарантоспособных компьютерных систем. Ч. 1. *Молодий вчений.* 2016. № 8(35). С. 169–173.

19. Федухин А.В., Муха Ар.А. Стратегия отказобезопасности как альтернатива полной отказоустойчивости при проектировании гарантоспособных компьютерных систем. Ч. 2. *Молодий вчений*. 2016. № 10 (37). С. 23–27.

20. Федухин А.В., Муха Ар.А., Сеспедес Гарсия Н.В. Доказательство безопасности компьютерных систем. *Математичні машини і системи.* 2016. №.3 С. 93–101.

21. Федухин А.В., Ярошенко В.Н., Муха Ар.А. О важных следствиях из формулы DN-распределения наработки до отказа. *Молодий вчений.* 2016. № 11 (38). С. 42–46.

22. Федухин А.В., Лутов С.Д., Сеспедес Гарсія Н.В., Ґедз О.В., Муха Ар.А. Система інформаційного сповіщення для залізничних переїздів «Благовіст». *Наука та Інновації.* 2017. № 13 (2). С. 29–35; Fedukhin A.V., Lutov S.D., Cespedes Garcia N.V., Gedz A.V., Mukha Ar. A. Blagovist: Information Warning System for Railroad Crossings. *Science and Innovation.* 2017. N13 (2). P. 27–32.

23. Федухин А.В., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. К вопросу о связи надежности и достоверности функционирования компьютерных систем. *Математичні машини і системи.* 2017. №. 2. С. 145–155.

24. Федухин А.В., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. К вопросу о надежности невосстанавливаемой системы с квазимостиковой структурой элементов. *Математичні машини і системи.* 2017. № 4. С. 160–168.

25. Федухин А.В., Муха Ар.А. Обеспечение живучести систем противоаварийной автоматики ГЭС. *Математичні машини і системи.* 2018. № 2. С. 169–194.

26. Федухин А.В., Стрельников В.П., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. Приближенная оценка надежности восстанавливаемых изделий на этапе эскизного проектирования. *Математичні машини і системи.* 2018. № 3. С. 149–155.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

27. Mukha Ar.A. Develoment of safety FPGA-based systems for automatic crossing signals for lavel crossing. *Strategy of Quality in Indastry and Education:* IX international conference (Varna, Bulgary, 2013). Varna, 2013. Vol. 1. P. 345–346.

28. Муха Ар.А. Гарантоспособность компьютерных систем – способность предоставлять требуемые услуги с высоким уровнем доверия. *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища INUDECO 18:* тези доп. III міжнар. конф. (м. Славутич, 25-27 квітня 2018 р.). Славутич, 2018. С. 258–265.

29. Федухин А.В., Муха Ар.А. Имитационное моделирование отказоустойчивой резервированной двухканальной системы в интегрированной инструментальной среде Matlab Simulink. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС -2010:* тези доп. 5-ої наук.-практ. конф. з міжнар. участю. (м. Київ, 25-29 червня 2010 р.). Київ, 2010. С. 225–226.

30. Федухин А.В., Муха Ар.А. Структурный синтез отказоустойчивых компьютерных систем. *Актуальні питання розвитку технічних наук в умовах глобальної нестабільності:* тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 13-14 квітня 2013 р.). Київ, 2013. С. 61–64.

31. Ґедз О.В., Муха Ар.А. Моделирование работы и отладка алгоритма функционирования контрольно-информационной системы для железнодорожных переездов «Благовест». *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС - 2016:* тези доп. 11-ої наук.-практ. конф. з міжнар. участю. (м. Київ, 25-29 червня 2016 р.). Київ, 2016. С. 246–247.

32. Федухин А.В., Муха Ар.А., Сеспедес Гарсия Н.В. Моделирование и аналитическая оценка надежности квазимостиковой структуры. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС-2017:* тези доп. Міжнар наук.-практ. конф.. (м. Чернігів, 25-29 червня 2017 р.). Чернігів, 2017. С. 282–288.

Додаток В

Кількісна оцінка рівня гарантоздатності, класифікація кс та моделювання і розрахунки надійності

В.1 Кількісна оцінка вагових коефіцієнтів атрибутів і метрик АМГКС експертним методом

Приклад В.1. Розглянемо метод розрахунку ваг якісних метрик. Для розрахунку використовуються такі вихідні дані: $m=5$; $n=6$.

Нехай якісним метрикам присвоєні такі експертні бали:

$$a_{11}=4 \quad a_{21}=3 \quad a_{31}=5 \quad a_{41}=1 \quad a_{51}=4;\ a_{12}=3 \quad a_{22}=3 \quad a_{32}=5 \quad a_{42}=2 \quad a_{52}=4,$$

$$a_{13}=5 \quad a_{23}=4 \quad a_{33}=4 \quad a_{43}=2 \quad a_{53}=3;\ a_{14}=4 \quad a_{24}=5 \quad a_{34}=4 \quad a_{44}=1 \quad a_{54}=3,$$

$$a_{15}=4 \quad a_{25}=4 \quad a_{35}=5 \quad a_{45}=2 \quad a_{55}=4;\ a_{16}=5 \quad a_{26}=3 \quad a_{36}=4 \quad a_{46}=1 \quad a_{56}=4.$$

Проміжні результати обчислень:

$$\sum_{j=1}^{6} a_{1j}=25,\ \sum_{j=1}^{6} a_{2j}=22,\ \sum_{j=1}^{6} a_{3j}=27,\ \sum_{j=1}^{6} a_{47}=9,\ \sum_{j=1}^{6} a_{5j}=22,\ \sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{6} a_{ij}=105.$$

Тоді ваги, розраховані за формулою (1.22) розділу 1.5.1 $b_i=\dfrac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}$, мають такі значення:

$$b_1=\frac{25}{105}=0.2380952,\ b_2=\frac{22}{105}=0.2095238,\ b_3=\frac{27}{105}=0.2571428,$$

$$b_4=\frac{9}{105}=0.0854142,\ b_5=\frac{22}{105}=0.2095238.$$ При цьому $\sum_{i=1}^{5} b_i=0.9999998\approx 1$.

За допомогою викладеного вище експертного методу можна оцінити ваги метрик і впливи атрибутів, які в подальшому будуть використовуватися для комплексної і порівняльної оцінки КС за рівнем гарантоздатності.

В.2 Порівняльна оцінка рівня гарантоздатності КС

Приклад В.2. Потрібно визначити середній рівень виконання критеріїв оцінки метрики цілісність обчислювальних ресурсів атрибута цілісність. Вихідні дані наведені в таблиці В.2.1.

Таблиця В.1 – Вихідні дані для оцінки середнього рівня виконання критеріїв метрики цілісність обчислювальних ресурсів (ОР)

№ п/п	Найменування критерію оцінки	Рівень виконання критерію оцінки U_l для систем	
		S_1	S_2
1	Правильність експлуатації ОР	0,98	1
2	Безпека експлуатації ОР	0,85	0,95
3	Успішність експлуатації ОР	0,9	0,85
4	Здатність перевіряти і зберігати дані	0,85	0,9
5	Здатність захисту від серйозних наслідків для цілісності у разі помилок	0,75	0,75
6	Здатність відновлювати цілісність після збоїв і помилок	0,8	0,9
7	Наявність захисту від порушень авторського права	0	0,85
8	Наявність функцій відновлення цілісності	0,95	0,95
9	Наявність функцій контролю цілісності	0,55	0,8

Продовження таблиці В.1

10	Наявність функцій ідентифікації і аутентифікації	0,85	0,85
11	Наявність коштів моніторингу та оповіщення	0,65	0,65
12	Наявність засобів обробки помилок	0	0,85

Обчислимо за формулою $U = \frac{\sum_{l=1}^{k} U_l}{k}$ (k=12) середній рівень виконання критеріїв оцінки метрики для двох конкуруючих систем. Отримаємо U_1=0,68, U_2=0,86. Не важко побачити, що рівень виконання метрики Цілісність обчислювальних ресурсів системи S_2 значно вище, ніж системи S_1.

Приклад В.3. Проведемо порівняння двох систем за атрибутами безвідмовність і готовність.

Метрики безвідмовності:

1) Ймовірність безвідмовної роботи відмовостійкої системи ${}_c^f R_s^q$**:**

$$ {}_c^f R_s^q = c^s (1 - {}^f F_s^q), $$

де ${}^f F_s^q$ – функція ймовірності відмови;

s – кількість резервів, спочатку доступних для підключення;

q – кількість модулів одного типу, що працюють паралельно (характеристика актуальна для систем, продуктивність яких залежить від кількості одночасно працюючих ресурсів);

c – ступінь компенсації наслідків відмови (умовна ймовірність того, що при виникненні відмови в працюючій системі остання здатна відновити інформацію і продовжити її обробку без довготривалої втрати даних);

f – здатність модуля допускати одиночні відмови до того, як він стане непрацездатним.

Беручи гіпотезу про DN-розподіл наробітку до відмови елементів, модулів і системи в цілому, ймовірність відмови будемо обчислювати таким чином:

$$ {}^{f}F_{s}^{q} = DN(x; v, f, q, s), $$

де v – коефіцієнт варіації наробітку до відмови, x – відносне напрацювання ($x = \frac{t}{T_{cp}}$, t – час роботи, T_{cp} – середній наробіток до відмови (на відмову).

Функція ймовірності відмови для DN-розподілу має такий вигляд:

$$ DN(x; v) = \Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) + \exp\left(2v^{-2}\right)\Phi\left(-\frac{x+1}{v\sqrt{x}}\right), $$

де $\Phi(*)$ – функція нормованого нормального розподілу.

Для вихідних даних систем T_{cp1}=1000 год, T_{cp1}=1500 год, $v = 0;75$ та t=200 год обчислюємо x_1=0,2 та x_2=0,13 і за допомогою таблиць DN- розподілу визначаємо ${}^{f}F_{s}^{q} = F_1$=0,01460 та ${}^{f}F_{s}^{q} = F_2$=0,00116, звідки ${}_{c}^{f}R_{s}^{q} = R_1$=0,9854 та ${}_{c}^{f}R_{s}^{q} = R_2$=0,9988. Відношення $Q_{11} = \frac{R_1}{R_2}$=0,9866. При вазі даної метрики b_{11}=0,25 добуток $Q_{11} \cdot b_{11}$=0,2466.

2) Поріг порівняння інформації в системі $M_{\tilde{n}}$:

$$ M_{\tilde{n}} = \prod_{i=1}^{n} M_{\tilde{n}i}, $$

де M_{ci} – поріг порівняння i-го послідовно включеного дорівнюючого пристрою.

Для розглянутих систем з одним дорівнюючим пристроєм нехай M_{c1}=3 та M_{c2}=2. Відношення $Q_{12} = \frac{M_{c1}}{M_{c2}}$=1,5. При вазі даної метрики b_{12}=0,2 добуток $Q_{12} \cdot b_{12}$=0,3.

3) Число працездатних конфігурацій системи $U_{\tilde{n}}$:

$$ U_c = \prod_{i=1}^{n} U_{ci}, $$

де U_{ci} – число робочих конфігурацій i - ої підсистеми.

Для розглянутих систем, які не мають підсистем, нехай U_{c1}=4 та U_{c2}=1. Відношення $Q_{13}=\frac{U_{c1}}{U_{c2}}$=4. При вазі даної метрики b_{13}=0,15 добуток $Q_{13}\cdot b_{13}$=0,6.

4) Число ненадлишкових каналів N_c:

Для розглянутих систем нехай N_{c1}=3 та N_{c2}=2. Відношення $Q_{14}=\frac{N_{c1}}{N_{c2}}$=1,5. При вазі даної метрики b_{14}=0,2 добуток $Q_{14}\cdot b_{14}$=0,3.

5) Ймовірність безвідмовної роботи ненадлишкового каналу системи $R_k(t)$:

Для розглянутих систем нехай R_{k1}=0,97 і R_{k2}=0,97. Відношення $Q_{15}=\frac{R_{k1}}{R_{k2}}$=1. При вазі даної метрики b_{15}=0,2 добуток $Q_{15}\cdot b_{15}$=0,2. Сума добутків $Q_{ср.1}=\sum_{j=1}^{n_{ij}} Q_{ij}\cdot b_{ij}$ (i=1) по всім кількісним метрикам 1-го атрибуту дорівнює $Q_{ср.1}$=1,6466. Нехай значимість 1-го атрибуту дорівнює B_1=0,25, тоді $Q_{ср.кіл.1}=Q_{ср.1}\cdot B_1$=0,4116.

Метрики готовності:

1) Коефіцієнт готовності $K_г$:

$$K_г = T_{ср} / (T_{ср} + T_в),$$

де $T_{ср}$ – середній наробіток на відмову (час роботи без збоїв) системи;

$T_в$ – середній час відновлення системи.

Для вихідних даних систем $T_{ср1}$=1000 год, $T_{ср1}$=1500 год, $T_{в1}$=0,5 год, $T_{в2}$=1 год. Для розглянутих систем $K_{г1}$=0,9995 та $K_{г2}$= 0,9993. Відношення $Q_{21}=\frac{K_{г1}}{K_{г2}}$=1,0002. При вазі даної метрики b_{21}=0,45 добуток $Q_{21}\cdot b_{21}$=0,45009.

2) Коефіцієнт оперативної готовності $K_{ог}$:

$$K_{ог} = K_{г} \cdot R(t),$$

де $R(t)$- ймовірність безвідмовної роботи системи на момент часу t.

Для вихідних даних $K_{г1}$=0,9995, $K_{г2}$= 0,9993, $R_1(t)$=0,9854 та $R_2(t)$=0,9988 отримуємо $K_{ог1}$= 0,9849 та $K_{ог2}$=0,9981. Відношення $Q_{22} = \frac{K_{ог1}}{K_{ог2}}$=0,9868. При вазі даної метрики b_{22}=0,55 добуток $Q_{22} \cdot b_{22}$=0,5427. Сума добутків $Q_{ср.2} = \sum_{j=1}^{n_{ij}} Q_{ij} \cdot b_{ij}$ (i=2) по всім кількісним метрикам 2-го атрибуту дорівнює $Q_{ср.2}$=0,9928. Нехай значимість 2-го атрибуту дорівнює B_2=0,2, тоді $O_{ср.кіл.2} = O_{ср.2} \cdot B_2$=0,1986.

У прикладах, які наведено в розрахунках, задіяні тільки два атрибути: безвідмовність і готовність. Але необхідно врахувати внесок й інших шести атрибутів, так як використовувані в експертних оцінках ваги і впливи ґрунтуються на умові, що сума ваг і впливів повинна дорівнювати 1.

Тому для скорочення розрахунків будемо вважати, що всі співвідношення чисельних значень загальних для обох систем S_1 та S_2 метрик дорівнюють 1. Тоді результатом первинного «зважування» таких співвідношень (за вагами метрик, у сумі рівних 1) також буде 1. Ці одиниці будуть загальним для всіх (відмінних від безвідмовності і готовності) атрибутів значенням розглянутих вище відповідних числових співвідношень для їх вторинного «зважування» вже за впливом атрибутів.

Частковий внесок у загальний результат вже обчислений при розгляді атрибутів безвідмовності і готовності. Оскільки внесок атрибутів, що залишилися, буде дорівнює сумі добутків одиниці на значимість відповідного атрибуту, а число добутків дорівнює числу таких атрибутів, то внесок цих атрибутів буде дорівнює сумі впливів всіх атрибутів (без безвідмовності і готовності), тобто величиною 1-(0,25 +0,2) = 0,55.

Нагадаємо, що вклади в загальну суму від атрибутів безвідмовність і готовність рівні $O_{ср.кіл.1}$=0,4116 та $O_{ср.кіл.2}$=0,1986. Додамо до них величину 0,55 та

отримаємо R=1,1602. Так як отримано число $R \geq 1$, то, згідно з прийнятим критерієм, система S_1 є кращою з точки зору гарантоздатності, ніж система S_2.

В.3 Метрики і критерії оцінки конфіденційності і цілісності КС

Таблиця В.2 –Метрики і критерії оцінки конфіденційності

Метрики конфіденційності	Назва критерію
Ймовірність загроз P_3 – імовірність порушень конфіденційності технічних засобів і (або) інформації	Правильність експлуатації обчислювальних ресурсів
	Безпека експлуатації обчислювальних ресурсів
	Здатність перевіряти і зберігати дані
	Здатність захисту від серйозних наслідків для конфіденційності у разі помилок
	Здатність відновлювати конфіденційність після збоїв і помилок
	Наявність захисту від порушень авторського права
	Наявність функцій відновлення конфіденційності
	Наявність функцій контролю конфіденційності
	Наявність захисту конфіденційності при роботі в локальній мережі
	Наявність захисту конфіденційності при роботі в середовищі Інтернет
	Наявність функцій ідентифікації і аутентифікації

Продовження таблиці В.2

	Наявність засобів моніторингу та оповіщення
	Наявність засобів обробки помилок
Рівень доступності $L_Д$-характеристика здатності системи забезпечувати фізичний захист від можливості зміни заданих параметрів технічних і інформаційних ресурсів у заданих точках за кінцевий час	Наявність документа, що регламентує доступ до секретної інформації
	Наявність документа, що регламентує доступ до технічних засобів
	Наявність паролів доступу до інформаційних ресурсів
	Наявність фізичного захисту технічних ресурсів
	Наявність захисту технічних ресурсів програмними засобами
	Наявність у персонала дозволу на роботу з секретними технічними і (або) інформаційними ресурсами
	Наявність засобів відновлення процесу в разі збоїв ОС, процесора, зовнішніх пристроїв
	Наявність вимог по стійкості функціонування при наявності помилок у вхідних даних, помилок користувача, відсутність необхідних даних (на диску, у файлі, в БД і т.д.)
	Сумісність з технічними засобами
	Сумісність з системними програмними засобами
	Сумісність з іншим програмним забезпеченням, включаючи обмін даними (з текстовими, графічними редакторами, БД та ін.)

Продовження таблиці В.2

	Наявність стійкості функціонування при наявності помилок у вхідних даних, помилок користувача, відсутність необхідних даних (на диску, у файлі, в БД і т.д.)
	Можливість обробки помилкових ситуацій
	Наявність можливості повторного старту з точки зупинки
Рівень секретності L_C – характеристика здатності системи зберігати секретність технічних і (або) інформаційних ресурсів	Наявність документа, що регламентує доступ до секретної інформації за рівнями таємності
	Наявність документа регламентує доступ до технічних засобів за рівнями таємності
	Наявність паролів доступу до інформаційних ресурсів
	Наявність фізичного захисту технічних ресурсів
	Наявність захисту технічних ресурсів програмними засобами
	Наявність у персонала дозволу на роботу з секретними технічними і (або) інформаційними ресурсами
	Наявність інформації про здатність перевіряти правильність введеної / виведеної інформації
	Наявність інформації про процедури зберігання даних
	Наявність тестів для перевірки допустимих значень вхідних / вихідних даних
	Наявність системи контролю повноти вхідних / вихідних даних

Продовження таблиці В.2

	Наявність засобів контролю коректності вхідних / вихідних даних
	Наявність засобів контролю несуперечливості вхідних/вихідних даних
	Наявність перевірки параметрів і адрес за діапазоном значень
	Наявність обробки граничних значень
	Наявність інформації про здатність відновлюватися після помилок

Таблиця В.3 – Метрики і критерии оцінки цілісності

Показники цілісності	Назва критерія
Цілісність обчислювальних ресурсів L_{OP} - властивість виключати непередбачені структурні зміни системи і послуг, що надаються	Правильність експлуатації обчислювальних ресурсів
	Безпека експлуатації обчислювальних ресурсів
	Успішність експлуатації обчислювальних ресурсів
	Здатність перевіряти і зберігати дані
	Здатність захисту від серйозних наслідків для цілісності у разі помилок
	Здатність відновлювати цілісність після збоїв і помилок
	Наявність захисту від порушень авторського права
	Наявність функцій відновлення цілісності
	Наявність функцій контролю цілісності

Продовження таблиці В.3

	Наявність функцій ідентифікації і аутентифікації
	Наявність засобів моніторингу та оповіщення
	Наявність засобів обробки помилок
Цілісність програмних ресурсів $L_{ПР}$ - властивість виключати непередбачені зміни програмних ресурсів системи	Наявність функцій в ПЗ з відновлення процесу виконання у разі збою операційної системи, процесора, зовнішніх пристроїв
	Наявність засобів відновлення процесу у разі збоїв обладнання
	Наявність можливості повторного старту з точки зупинки
	Наявність автоматичного резервування для збереження поточного стану процесу
	Наявність вимог зі стійкості функціонування при наявності помилок у вхідних даних, помилок користувача, відсутність необхідних даних (на диску, у файлі, в БД і т.д.)
	Сумісність із технічними засобами
	Сумісність із системними програмними засобами
	Сумісність з іншим програмним забезпеченням, включаючи обмін даними (з текстовими, графічними редакторами, БД та ін.)
	Можливість обробки помилкових ситуацій

Продовження таблиці В.3

Цілісність інформації L_I – здатність ГКС забезпечувати незмінність інформації в умовах випадкового і (або) навмисного спотворення (руйнування).	Достовірність
	Точність
	Якість
	Своєчасність
	Правильність
	Наявність інформації про здатність перевіряти правильність введеної / виведеної інформації
	Наявність інформації про процедури зберігання даних
	Наявність тестів для перевірки допустимих значень вхідних / вихідних даних
	Наявність системи контролю повноти вхідних / вихідних даних
	Наявність засобів контролю коректності вхідних / вихідних даних
	Наявність засобів контролю несуперечності вхідних / вихідних даних
	Наявність перевірки параметрів і адрес за діапазоном значень
	Наявність обробки граничних значень
	Наявність інформації про здатність відновлюватися після помилок

В 4 Класифікація двоканальних відмовостійких структур КС

В 4.1 Дубльована система зі слабкими зв'язками

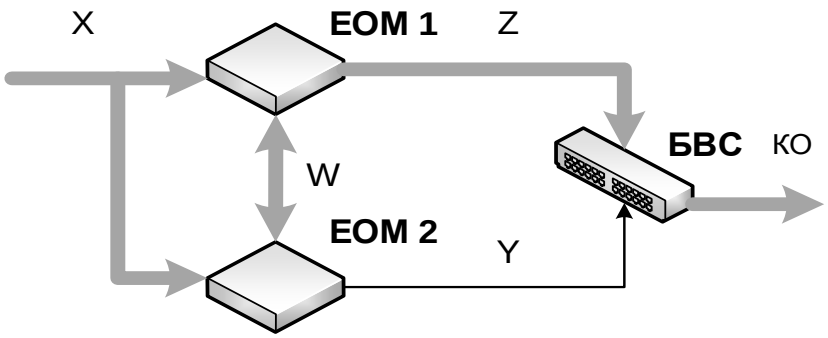


Рисунок В.1 – Дубльована система зі слабкими зв'язками

Дубльована система зі слабкими зв'язками складається з двох обчислювальних каналів, у яких процесори і програми можуть бути різними. Процесор ЕОМ1 реалізує основні обчислення, а ЕОМ2 їх перевіряє. Для цього здійснюється обмін інформацією по шині W. Синхронізація каналів необов'язкова.

Безпека таких систем залежить від достовірності контролю функціонування обчислювальних каналів. Контроль роботи ЕОМ здійснюється або за рахунок тестових програм або паралельних обчислень однаковими чи диверситетними програмами і порівнянням результатів. При виявленні помилки ЕОМ2 формує сигнал Y і виходи ЕОМ1 відключаються від КО за допомогою безпечних вихідних схем БВС.

При організації паралельних обчислень за однаковими алгоритмами стає можливим порівняння проміжних результатів обчислень у контрольних точках. Порівняння результатів проводиться програмно в ЕОМ2. Для забезпечення своєчасного відключення обчислювального каналу, що відмовив, необхідно, щоб контролююча ЕОМ виконувала обчислення не повільніше, ніж основна ЕОМ. Це досягається або використанням процесора з більш високою швидкодією, або використанням програм з більш короткими алгоритмами обчислень. При цьому необхідно забезпечити одночасне зчитування вихідних даних в обидва

обчислювальні канали. Можливе використання ідентичних обчислювальних каналів і програмного забезпечення.

Переваги:

- висока гнучкість; можливість використання диверситетних обчислювальних каналів, що дозволяє з високою точністю виявляти відмови апаратних засобів і помилки в програмному забезпеченні;
- відсутність синхронізації каналів, що спрощує схемну реалізацію і зменшує ймовірність виникнення однакових відмов і збоїв в обох каналах.

Недоліки:

- високі витрати на проектування диверситетних обчислювальних каналів і програмного забезпечення; складність вибору точок для контролю проміжних обчислень, так як потрібно забезпечити високу вірогідність контролю при мінімальній кількості перевірок;
- можливість накопичення відмов, що маскуються, в обох обчислювальних каналах; необхідність організації контролю за правильністю програмного порівняння результатів в ЕОМ2, так як відмови в ЕОМ2 не повинні спотворювати результати контролю;
- невисока експлуатаційна готовність, так як будь-яка відмова переводить систему в непрацездатний захисний стан.

В.4.2 Дубльована система з сильними зв'язками

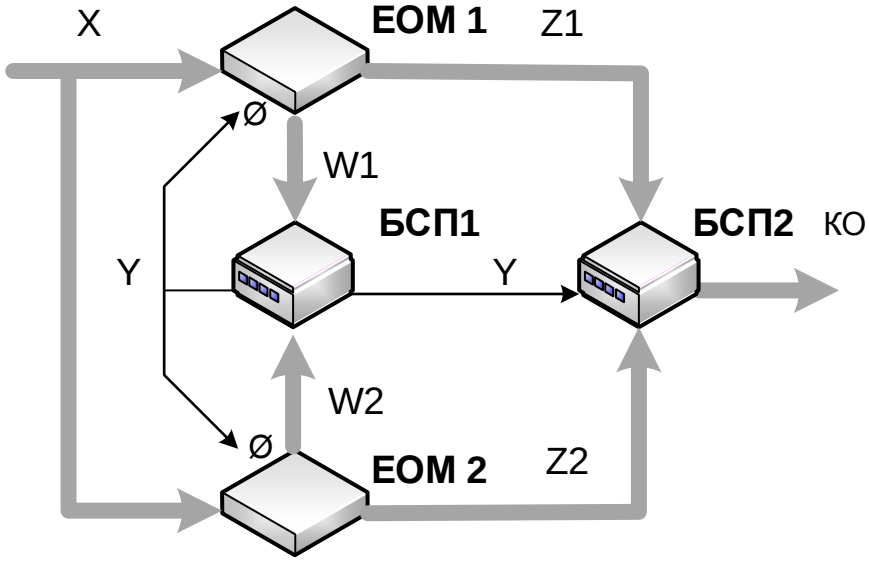


Рисунок В.2 – Дубльована система з сильними зв'язками

Дубльована система з сильними зв'язками використовує однакові програми в двох однакових обчислювальних каналах, але на відміну від системи з помірними зв'язками контроль роботи двох каналів здійснюється не тільки на рівні виходів, але й на рівні шин і пам'яті.

Робота каналів синхронізована. Синхронізація організовується за командам, або за тактами. У найбільш сильному випадку проводиться потактова перевірка відповідності до сигналів W1 і W2 на внутрішніх контрольних точках (шинах) за допомогою безпечної схеми порівняння БСП1. При розбіжності сигналів W1 і W2 БСП1 формує сигнал помилки Y. Сигнал Y впливає на БСП2 і відключає КО, тобто переводить обидва канали в захисний стан. Потім сигнал Y, вступаючи на вхід Ø, блокує роботу двох ЕОМ.

Структура має високий рівень безпеки, який залежить від виду і числа контрольованих розрядів (сигнали W1 і W2). Поодинокі відмови безпечні і повинні виявлятися БСП1. Однак, якщо безліч вхідних впливів X не забезпечує необхідної глибини перевірки каналів обробки інформації, то можлива поява відмов, що маскуються, тобто відмов, які не виявляються на даному проміжку часу у вигляді

розбіжності сигналів W1 і W2. Накопичення таких відмов може призвести до небезпечної відмови системи. Це тим більш актуально, що деякі алгоритми функціонування системи можуть виконуватися дуже рідко (раз на тиждень або раз на місяць).

Переваги:

- невисока вартість; витрати на проектування обчислювальних каналів і програмного забезпечення нижче, ніж в інших структурах;
- висока глибина контролю окремих функціональних вузлів ЕОМ (процесора, пам'яті, портів введення-виведення) при організації порівняння шин внутрішнього інтерфейсу;
- висока безпека.

Недоліки:

- можливість накопичення відмов що маскуються в рідко використовуваних опціях вузлів обчислювальних каналів;
- неможливість виявлення помилок в програмному забезпеченні, так як вони однаково проявляються в обох каналах; необхідність забезпечення високої надійності схеми синхронізації каналів;
- невисока експлуатаційна готовність, так як будь-яка відмова переводить систему в неробочий захисний стан.

В.4.3 Дубльована система з сильними зв'язками і зовнішнім тестуванням

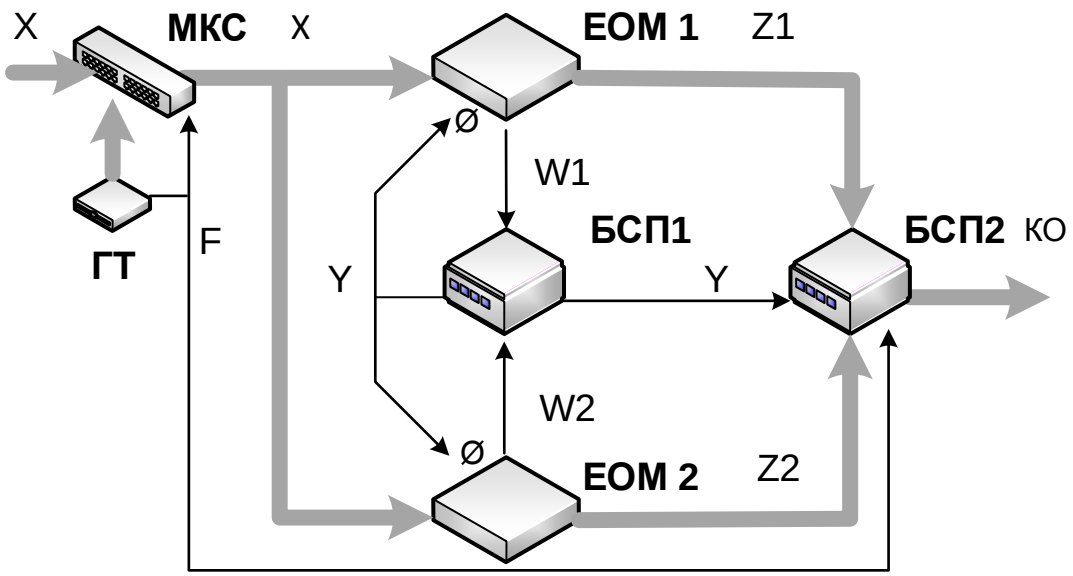


Рисунок В.3 – Дубльована система з сильними зв'язками і зовнішнім тестуванням

Дубльована система з сильними зв'язками і зовнішнім тестуванням містить у додаток до попередньої структури генератор тестів і мультиплексор (МКС) та застосовується, якщо безліч вхідних впливів X не забезпечує необхідної глибини перевірки каналів обробки інформації.

У цьому випадку в процесі робочого функціонування періодично виділяються відрізки часу, протягом яких за сигналом F, що надходить на мультиплексор МКС, вхідні впливи X відключаються від входів системи і до останніх підключаються виходи T генератора тестів. Сигнал F також блокує вихідну безпечну схему порівняння БСП2, щоб тестові впливи не пройшли на об'єкти управління. Результати тестування обох каналів порівнюються БСП1. При виявленні помилки система переводиться в захисний стан. Після закінчення тестування сигнал F знімається, вхідні впливи X підключаються до входів системи і вихідна безпечна схема порівняння включається в роботу.

Даний принцип використовується також тоді, коли система більшу частину робочого функціонування знаходиться в режимі очікування, при цьому сигнали X тривалий час не змінюються.

Безпека такої структури залежить від повноти тестів і часу, необхідного на тестування, тому що під час тестування об'єкт управління не контролюється. Тому застосування дубльованої системи з сильними зв'язками і зовнішнім тестуванням виправдано в тому випадку, коли сума часу тестування і часу, необхідного на обробку вхідних впливів, менше часу реакції системи.

Переваги:

- висока глибина контролю окремих функціональних вузлів ЕОМ (процесора, пам'яті, портів введення-виведення);
- відсутність відмов що маскуються;
- висока безпека.

Недоліки:

- додаткові витрати на розробку генератора тестів і тестових впливів;
- неможливість виявлення помилок в програмному забезпеченні;
- необхідність забезпечення високої надійності схеми синхронізації каналів;
- невисока експлуатаційна готовність, так як будь-яка відмова переводить систему в неробочий захисний стан.

В.4.4 Алгоритм алгоритму моделювання надійності невідновлюваної квазімісткової структури

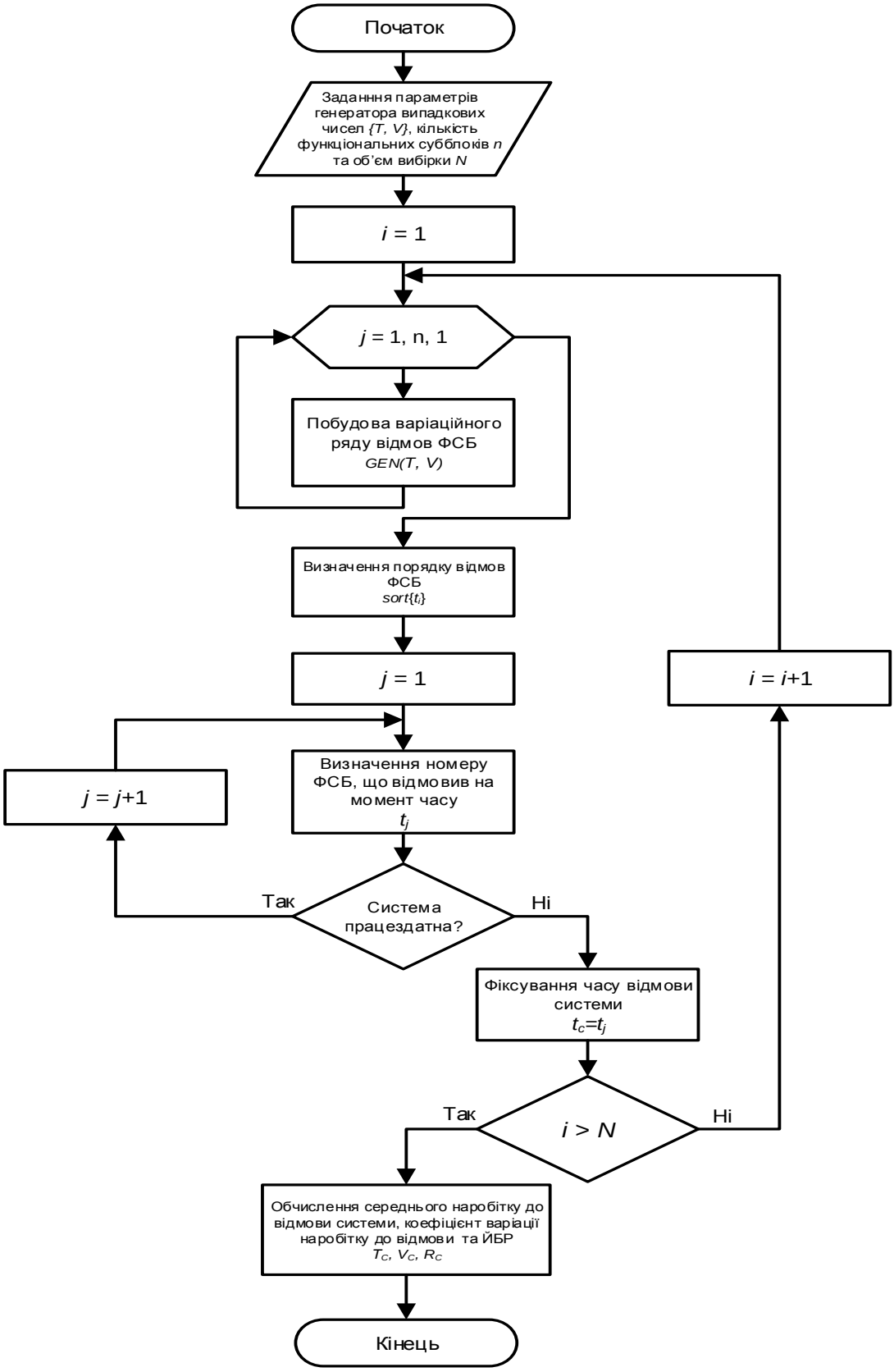


Рисунок В.4 – Блок-схема алгоритму моделювання надійності невідновлюваної квазімісткової структури

В.4.5 Алгоритм алгоритму моделювання надійності відновлюваної квазімісткової структури

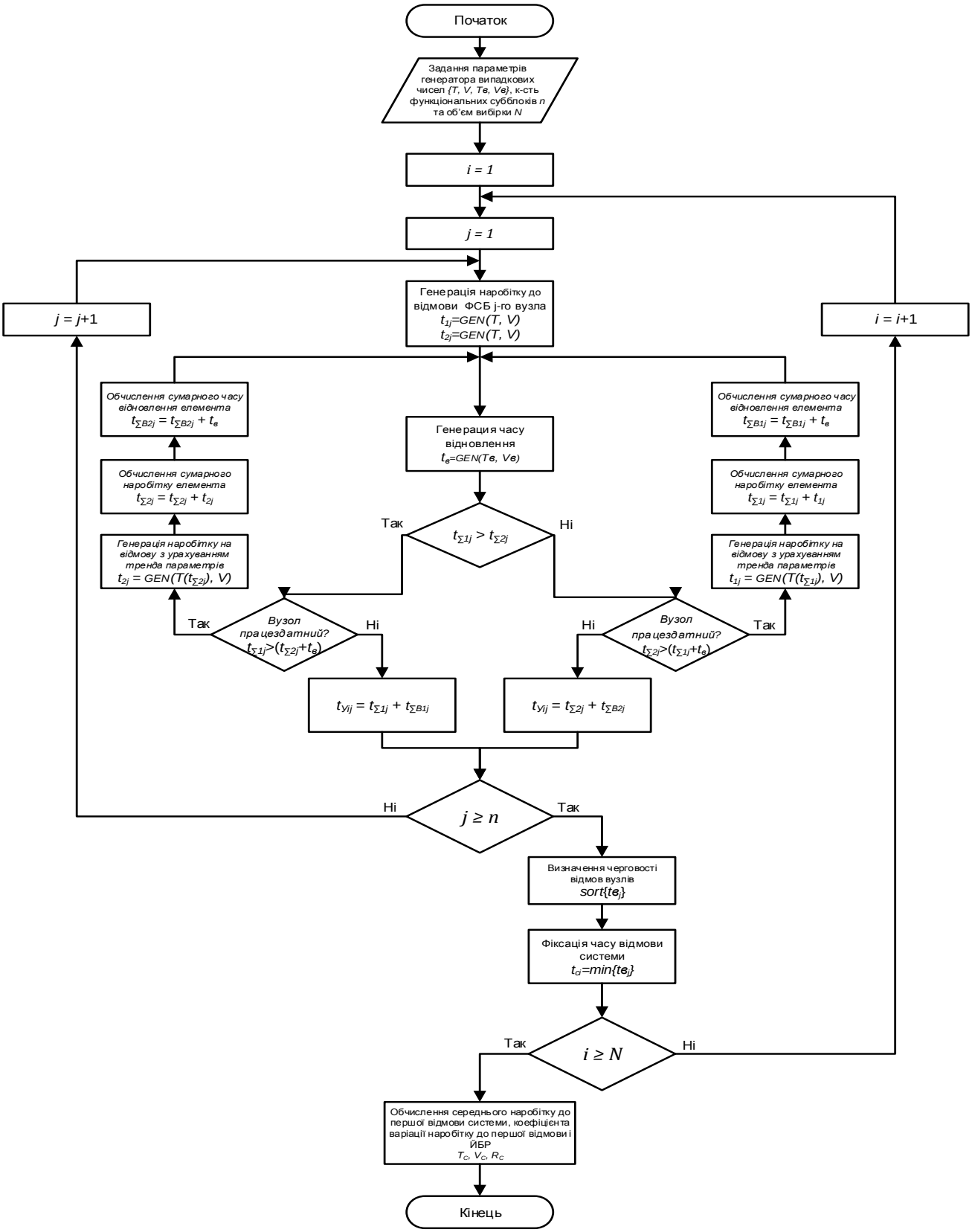


Рисунок В.5 – Блок-схема алгоритму моделювання надійності відновлювальної квазімісткової структури

В.4.6.1 Стани квазімісткової структури з 3-х вузлів

Таблиця В.4– Таблиця станів квазімісткової структури з 3-х вузлів

Працездатні стани структури, A_i	ФБ, що відмовили за час, t	ФБ, що працювали без відмов протягом часу, t
A_1	-	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3
A_2	1.1	1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3
A_3	2.1	1.1, 1.2, 1.3, 2.2, 2.3
A_4	1.2	1.1, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3
A_5	2.2	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.3
A_6	1.3	1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 2.3
A_7	2.3	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2
A_8	1.1, 1.2	1.3, 2.1, 2.2, 2.3
A_9	1.1, 1.3	1.2, 2.1, 2.2, 2.3
A_{10}	1.1, 2.2	1.2, 1.3, 2.1, 2.3
A_{11}	1.1, 2.3	1.2, 1.3, 2.1, 2.2,
A_{12}	1.2, 1.3	1.1, 2.1, 2.2, 2.3
A_{13}	1.2, 2.1	1.1, 1.3, 2.2, 2.3
A_{14}	1.2, 2.3	1.1, 1.3, 2.1, 2.2,
A_{15}	1.3, 2.1	1.1, 1.2, 2.2, 2.3
A_{16}	1.3,2.2	1.1, 1.2, 2.1, 2.3
A_{17}	2.1, 2.2	1.1, 1.2, 1.3, 2.3
A_{18}	2.1, 2.3	1.1, 1.2, 1.3, 2.2
A_{19}	2.2, 2.3	1.1, 1.2, 1.3, 2.1
A_{20}	1.1, 1.2, 1.3	2.1, 2.2, 2.3
A_{21}	1.1, 1.2, 2.3	1.3, 2.1, 2.2

Продовження таблиці В.4

A_{22}	1.1, 1.3, 2.2	1.2, 2.1, 2.3
A_{23}	2.1, 2.2, 2.3	1.1, 1.2, 1.3
A_{24}	2.1, 2.2, 1.3	1.1, 1.2, 2.3
A_{25}	2.1, 2.3, 1.2	1.1, 1.3, 2.2

В.4.6.1 Ймовірності працездатних подій квазімісткової структури з 3-х вузлів

$$P(A_1) = R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_2) = F_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.1}) \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_3) = F_{2.1} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{2.1}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_4) = F_{1.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_5) = F_{2.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{2.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_6) = F_{1.3} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.3}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_7) = F_{2.3} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{2.3}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_8) = F_{1.1} \cdot F_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.1}) \cdot (1 - R_{1.2}) \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_9) = F_{1.1} \cdot F_{1.3} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.1}) \cdot (1 - R_{1.3}) \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{10}) = F_{1.1} \cdot F_{2.2} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.1}) \cdot (1 - R_{2.2}) \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{11}) = F_{1.1} \cdot F_{2.3} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{1.1}) \cdot (1 - R_{2.3}) \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_{12}) = F_{1.2} \cdot F_{1.3} \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.2}) \cdot (1 - R_{1.3}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{13}) = F_{1.2} \cdot F_{2.1} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.2}) \cdot (1 - R_{2.1}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{14}) = F_{1.2} \cdot F_{2.3} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{1.2}) \cdot (1 - R_{2.3}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_{15}) = F_{1.3} \cdot F_{2.1} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.3}) \cdot (1 - R_{2.1}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{16}) = F_{1.3} \cdot F_{2.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.3}) \cdot (1 - R_{2.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{17}) = F_{2.1} \cdot F_{2.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{2.1}) \cdot (1 - R_{2.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{18}) = F_{2.1} \cdot F_{2.3} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{2.1}) \cdot (1 - R_{2.3}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_{19}) = F_{2.2} \cdot F_{2.3} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} = (1 - R_{2.2}) \cdot (1 - R_{2.3}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1},$$

$$P(A_{20}) = F_{1.1} \cdot F_{1.2} \cdot F_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.1}) \cdot (1 - R_{1.2}) \cdot (1 - R_{1.3}) \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{21}) = F_{1.1} \cdot F_{1.2} \cdot F_{2.3} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{1.1}) \cdot (1 - R_{1.2}) \cdot (1 - R_{2.3}) \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_{22}) = F_{1.1} \cdot F_{1.3} \cdot F_{2.2} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.1}) \cdot (1 - R_{1.3}) \cdot (1 - R_{2.2}) \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{23}) = F_{2.1} \cdot F_{2.2} \cdot F_{2.3} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} = (1 - R_{2.1}) \cdot (1 - R_{2.2}) \cdot (1 - R_{2.3}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3},$$

$$P(A_{24}) = F_{2.1} \cdot F_{2.2} \cdot F_{1.3} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{2.1}) \cdot (1 - R_{2.2}) \cdot (1 - R_{1.3}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{25}) = F_{2.1} \cdot F_{2.3} \cdot F_{1.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{2.1}) \cdot (1 - R_{2.3}) \cdot (1 - R_{1.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.2}.$$

При рівнонадійних ФСБ:

$$P(A_1) = R^6{}_{ФСБ},$$

$$P(A_2) = P(A_3) = P(A_4) = P(A_5) = P(A_6) = P(A_7) = (1 - R_{ФСБ}) \cdot R^5{}_{ФСБ},$$

$$P(A_8) = P(A_9) = P(A_{10}) = P(A_{11}) = P(A_{12}) = P(A_{13}) = P(A_{14}) =,$$

$$= P(A_{15}) = P(A_{16}) = P(A_{17}) = P(A_{18}) = P(A_{19}) = (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R^4{}_{ФСБ}$$

$$P(A_{20}) = P(A_{21}) = P(A_{22}) = P(A_{23}) = P(A_{24}) = P(A_{25}) = (1 - R_{ФСБ})^3 \cdot R^3{}_{ФСБ}.$$

Додаток Д

Таблиці для визначення показників надійності

Функція *DN*-розподілу $F(\mathrm{x}) = DN(x;v) = \Phi\left(\frac{x-1}{v\sqrt{x}}\right) + \exp\left(2v^{-2}\right)\cdot\Phi\left(-\frac{x+1}{v\sqrt{x}}\right)$,

де $x = \frac{t_н}{s}$

Таблиця Д.1 – Коефіцієнт варіації v=0,25

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.3	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00001	0,00002	0,00003	0,00005
0.4	0,00007	0,00011	0,00017	0,00025	0,00037	0,00052	0,00072	0,00099	0,00134	0,00178
0.5	0,00234	0,00303	0,00388	0,00491	0,00614	0,00761	0,00934	0,01136	0,01369	0,02514
0.6	0,02820	0,03166	0,03555	0,03988	0,04470	0,05001	0,05583	0,07095	0,07784	0,08528
0.7	0,09328	0,10184	0,11096	0,12941	0,13964	0,15041	0,16171	0,17352	0,18583	0,20738
0.8	0,22061	0,23428	0,24834	0,26278	0,27756	0,30142	0,31680	0,33243	0,34827	0,36430
0.9	0,38048	0,39678	0,41317	0,42961	0,44608	0,47131	0,48774	0,50411	0,52040	0,53657
1.0	0,55260	0,56847	0,58417	0,59966	0,61494	0,62997	0,64476	0,65052	0,66476	0,67872
1.1	0,69237	0,70572	0,71876	0,73147	0,74386	0,75592	0,76765	0,77905	0,79011	0,79207
1.2	0,80246	0,81252	0,82226	0,83167	0,84075	0,84952	0,85797	0,86612	0,86520	0,87275
1.3	0,88001	0,88698	0,89368	0,90011	0,90627	0,91218	0,91785	0,92327	0,91968	0,92464
1.4	0,92939	0,93391	0,93824	0,94236	0,94630	0,95005	0,95363	0,95703	0,96028	0,96336
1.5	0,95753	0,96032	0,96297	0,96549	0,96789	0,97016	0,97232	0,97436	0,97630	0,97814
1.6	0,97988	0,98153	0,98309	0,98457	0,98596	0,98729	0,98854	0,98972	0,99084	0,99189
1.7	0,99289	0,99383	0,98595	0,98679	0,98758	0,98833	0,98903	0,98970	0,99032	0,99091
1.8	0,99146	0,99199	0,99248	0,99294	0,99338	0,99379	0,99417	0,99453	0,99487	0,99519
1.9	0,99550	0,99578	0,99604	0,99629	0,99653	0,99675	0,99695	0,99715	0,99733	0,99750
2.0	0,99766	0,99781	0,99795	0,99808	0,99821	0,99832	0,99843	0,99853	0,99863	0,99872
2.1	0,99880	0,99888	0,99895	0,99902	0,99909	0,99915	0,99920	0,99926	0,99931	0,99935
2.2	0,99939	0,99943	0,99947	0,99951	0,99954	0,99957	0,99960	0,99963	0,99965	0,99967
2.3	0,99970	0,99972	0,99974	0,99975	0,99977	0,99979	0,99980	0,99981	0,99983	0,99984
2.4	0,99985	0,99986	0,99987	0,99988	0,99989	0,99989	0,99990	0,99991	0,99991	0,99992
2.5	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99994	0,99995	0,99995	0,99996	0,99996	0,99996
2.6	0,99996	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99997	0,99998	0,99998	0,99998	0,99998
2.7	0,99998	0,99998	0,99998	0,99999	0,99999	0,99999	0,99999	0,99999	0,99999	0,99999

Приклад: $F(x)$=0,93824, x=1,42, x=0,55, $F(x)$=0,00761.

Примітка. Якщо при вирішенні задачі в таблицях відсутнє точне значення параметрів x і/або v, результат рішення здійснюється шляхом екстраполювання даних.

Таблиця Д.2 – Коефіцієнт варіації v=0.3

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001
0.3	0.00002	0.00003	0.00005	0.00008	0.00012	0.00019	0.00028	0.00041	0.00059	0.00083
0.4	0.00114	0.00155	0.00206	0.00270	0.00349	0.00445	0.00560	0.00698	0.00860	0.01049
0.5	0.01268	0.01518	0.01803	0.02125	0.02485	0.02886	0.03330	0.03818	0.04351	0.04931
0.6	0.05558	0.06233	0.06957	0.07729	0.08549	0.09417	0.10332	0.11293	0.12299	0.13349
0.7	0.14441	0.15573	0.16744	0.17951	0.19193	0.20467	0.21771	0.23103	0.24460	0.25839
0.8	0.27238	0.28655	0.30087	0.31531	0.32986	0.34448	0.35916	0.37387	0.38858	0.40328
0.9	0.41795	0.43257	0.44711	0.46157	0.47591	0.49014	0.50422	0.51815	0.53191	0.54550
1.0	0.55889	0.57209	0.58508	0.59785	0.61039	0.62271	0.63478	0.64662	0.65820	0.66954
1.1	0.68062	0.69145	0.70202	0.71234	0.72239	0.73219	0.74173	0.75101	0.76004	0.76882
1.2	0.77735	0.78563	0.79366	0.80145	0.80900	0.81632	0.82341	0.83027	0.83691	0.84333
1.3	0.84954	0.85554	0.86133	0.86693	0.87233	0.87754	0.88256	0.88741	0.89208	0.89657
1.4	0.90090	0.90507	0.90909	0.91295	0.91666	0.92024	0.92367	0.92697	0.93014	0.93318
1.5	0.93610	0.93891	0.94160	0.94419	0.94667	0.94904	0.95132	0.95350	0.95560	0.95760
1.6	0.95952	0.96136	0.96312	0.96481	0.96642	0.96797	0.96944	0.97086	0.97221	0.97350
1.7	0.97473	0.97591	0.97704	0.97812	0.97915	0.98013	0.98107	0.98197	0.98282	0.98364
1.8	0.98442	0.98517	0.98588	0.98656	0.98720	0.98782	0.98841	0.98897	0.98950	0.99001
1.9	0.99050	0.99096	0.99140	0.99182	0.99222	0.99260	0.99297	0.99331	0.99364	0.99396
2.0	0.99425	0.99454	0.99481	0.99507	0.99531	0.99554	0.99577	0.99598	0.99618	0.99637
2.1	0.99655	0.99672	0.99689	0.99705	0.99719	0.99734	0.99747	0.99760	0.99772	0.99784
2.2	0.99794	0.99805	0.99815	0.99824	0.99833	0.99842	0.99850	0.99857	0.99865	0.99872
2.3	0.99878	0.99884	0.99890	0.99896	0.99901	0.99906	0.99911	0.99916	0.99920	0.99924
2.4	0.99928	0.99932	0.99935	0.99939	0.99942	0.99945	0.99948	0.99950	0.99953	0.99955
2.5	0.99958	0.99960	0.99962	0.99964	0.99966	0.99968	0.99969	0.99971	0.99972	0.99974
2.6	0.99975	0.99977	0.99978	0.99979	0.99980	0.99981	0.99982	0.99983	0.99984	0.99985
2.7	0.99986	0.99986	0.99987	0.99988	0.99988	0.99989	0.99990	0.99990	0.99991	0.99991
2.8	0.99992	0.99992	0.99992	0.99993	0.99993	0.99994	0.99994	0.99994	0.99995	0.99995
2.9	0.99995	0.99995	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997
3.0	0.99997	0.99997	0.99997	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998
3.1	0.99998	0.99998	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999

Таблиця Д.3 – Коефіцієнт варіації v=0.4

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.2	0.00001	0.00002	0.00003	0.00006	0.00010	0.00016	0.00026	0.00040	0.00059	0.00085
0.3	0.00119	0.00164	0.00220	0.00291	0.00378	0.00483	0.00609	0.00757	0.00930	0.01130
0.4	0.01358	0.01617	0.01907	0.02231	0.02589	0.02983	0.03413	0.03881	0.04386	0.04929
0.5	0.05510	0.06128	0.06784	0.07477	0.08206	0.08971	0.09770	0.10603	0.11468	0.12364
0.6	0.13290	0.14245	0.15226	0.16233	0.17263	0.18316	0.19389	0.20481	0.21590	0.22715
0.7	0.23854	0.25006	0.26168	0.27339	0.28519	0.29704	0.30895	0.32089	0.33285	0.34482
0.8	0.35679	0.36873	0.38066	0.39254	0.40437	0.41615	0.42786	0.43949	0.45103	0.46248
0.9	0.47384	0.48508	0.49621	0.50722	0.51811	0.52887	0.53949	0.54997	0.56032	0.57051
1.0	0.58056	0.59046	0.60020	0.60979	0.61922	0.62850	0.63761	0.64657	0.65536	0.66399
1.1	0.67246	0.68077	0.68892	0.69691	0.70474	0.71241	0.71992	0.72727	0.73447	0.74152
1.2	0.74841	0.75515	0.76174	0.76818	0.77448	0.78063	0.78664	0.79251	0.79824	0.80383
1.3	0.80929	0.81462	0.81982	0.82489	0.82983	0.83465	0.83935	0.84394	0.84840	0.85275
1.4	0.85699	0.86112	0.86514	0.86906	0.87287	0.87658	0.88020	0.88371	0.88714	0.89047
1.5	0.89371	0.89686	0.89992	0.90290	0.90580	0.90862	0.91136	0.91403	0.91661	0.91913
1.6	0.92158	0.92395	0.92626	0.92850	0.93068	0.93280	0.93485	0.93685	0.93879	0.94067
1.7	0.94250	0.94427	0.94599	0.94766	0.94929	0.95086	0.95239	0.95387	0.95531	0.95671
1.8	0.95806	0.95938	0.96065	0.96189	0.96309	0.96425	0.96538	0.96647	0.96753	0.96856
1.9	0.96956	0.97052	0.97146	0.97237	0.97325	0.97410	0.97493	0.97573	0.97651	0.97726
2.0	0.97799	0.97870	0.97938	0.98005	0.98069	0.98131	0.98192	0.98250	0.98307	0.98362
2.1	0.98415	0.98466	0.98516	0.98564	0.98611	0.98656	0.98700	0.98743	0.98784	0.98824
2.2	0.98862	0.98900	0.98936	0.98971	0.99004	0.99037	0.99069	0.99100	0.99129	0.99158
2.3	0.99186	0.99213	0.99239	0.99264	0.99289	0.99312	0.99335	0.99357	0.99379	0.99400
2.4	0.99420	0.99439	0.99458	0.99476	0.99493	0.99510	0.99527	0.99543	0.99558	0.99573
2.5	0.99587	0.99601	0.99615	0.99628	0.99640	0.99653	0.99664	0.99676	0.99687	0.99697
2.6	0.99708	0.99718	0.99727	0.99737	0.99746	0.99754	0.99763	0.99771	0.99779	0.99786
2.7	0.99794	0.99801	0.99808	0.99814	0.99821	0.99827	0.99833	0.99839	0.99844	0.99850
2.8	0.99855	0.99860	0.99865	0.99869	0.99874	0.99878	0.99883	0.99887	0.99891	0.99894
2.9	0.99898	0.99902	0.99905	0.99909	0.99912	0.99915	0.99918	0.99921	0.99924	0.99926
3.0	0.99929	0.99931	0.99934	0.99936	0.99939	0.99941	0.99943	0.99945	0.99947	0.99949
3.1	0.99951	0.99952	0.99954	0.99956	0.99957	0.99959	0.99960	0.99962	0.99963	0.99965
3.2	0.99966	0.99967	0.99968	0.99970	0.99971	0.99972	0.99973	0.99974	0.99975	0.99976
3.3	0.99977	0.99977	0.99978	0.99979	0.99980	0.99981	0.99981	0.99982	0.99983	0.99983
3.4	0.99984	0.99985	0.99985	0.99986	0.99986	0.99987	0.99987	0.99988	0.99988	0.99989
3.5	0.99989	0.99990	0.99990	0.99990	0.99991	0.99991	0.99991	0.99992	0.99992	0.99992
3.6	0.99993	0.99993	0.99993	0.99994	0.99994	0.99994	0.99994	0.99995	0.99995	0.99995
3.7	0.99995	0.99995	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99997	0.99997
3.8	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998
3.9	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999

Таблиця Д.4 – Коефіцієнт варіації v=0.5

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00003	0.00005	0.00010	0.00018
0.2	0.00030	0.00049	0.00076	0.00112	0.00161	0.00225	0.00305	0.00405	0.00527	0.00674
0.3	0.00846	0.01047	0.01277	0.01539	0.01834	0.02162	0.02525	0.02923	0.03357	0.03826
0.4	0.04331	0.04871	0.05445	0.06054	0.06695	0.07369	0.08075	0.08810	0.09574	0.10366
0.5	0.11184	0.12027	0.12894	0.13782	0.14691	0.15619	0.16565	0.17527	0.18504	0.19494
0.6	0.20496	0.21508	0.22530	0.23560	0.24597	0.25639	0.26686	0.27736	0.28788	0.29841
0.7	0.30895	0.31948	0.33000	0.34049	0.35095	0.36138	0.37175	0.38207	0.39234	0.40253
0.8	0.41266	0.42271	0.43269	0.44257	0.45237	0.46207	0.47168	0.48119	0.49060	0.49990
0.9	0.50909	0.51818	0.52715	0.53601	0.54476	0.55339	0.56190	0.57030	0.57857	0.58673
1.0	0.59477	0.60269	0.61049	0.61817	0.62573	0.63317	0.64049	0.64769	0.65477	0.66174
1.1	0.66859	0.67532	0.68194	0.68844	0.69483	0.70111	0.70727	0.71333	0.71927	0.72511
1.2	0.73084	0.73647	0.74199	0.74741	0.75272	0.75794	0.76305	0.76807	0.77299	0.77782
1.3	0.78255	0.78719	0.79174	0.79620	0.80057	0.80486	0.80906	0.81317	0.81720	0.82115
1.4	0.82502	0.82882	0.83253	0.83617	0.83974	0.84323	0.84665	0.85000	0.85327	0.85649
1.5	0.85963	0.86271	0.86572	0.86867	0.87156	0.87439	0.87716	0.87986	0.88252	0.88511
1.6	0.88765	0.89014	0.89257	0.89495	0.89728	0.89956	0.90179	0.90397	0.90611	0.90819
1.7	0.91024	0.91224	0.91419	0.91611	0.91798	0.91981	0.92160	0.92335	0.92507	0.92674
1.8	0.92838	0.92998	0.93155	0.93309	0.93459	0.93605	0.93749	0.93889	0.94026	0.94160
1.9	0.94292	0.94420	0.94545	0.94668	0.94788	0.94905	0.95020	0.95132	0.95242	0.95349
2.0	0.95454	0.95556	0.95656	0.95754	0.95850	0.95944	0.96035	0.96125	0.96212	0.96298
2.1	0.96381	0.96463	0.96543	0.96621	0.96697	0.96772	0.96845	0.96916	0.96986	0.97054
2.2	0.97121	0.97186	0.97250	0.97312	0.97373	0.97432	0.97490	0.97547	0.97603	0.97657
2.3	0.97710	0.97762	0.97813	0.97862	0.97911	0.97958	0.98004	0.98050	0.98094	0.98137
2.4	0.98179	0.98220	0.98261	0.98300	0.98339	0.98376	0.98413	0.98449	0.98484	0.98519
2.5	0.98552	0.98585	0.98617	0.98649	0.98679	0.98709	0.98739	0.98767	0.98795	0.98823
2.6	0.98849	0.98875	0.98901	0.98926	0.98950	0.98974	0.98997	0.99020	0.99042	0.99064
2.7	0.99085	0.99106	0.99127	0.99146	0.99166	0.99185	0.99203	0.99221	0.99239	0.99256
2.8	0.99273	0.99290	0.99306	0.99322	0.99337	0.99352	0.99367	0.99381	0.99395	0.99409
2.9	0.99422	0.99436	0.99448	0.99461	0.99473	0.99485	0.99497	0.99508	0.99520	0.99530
3.0	0.99541	0.99552	0.99562	0.99572	0.99581	0.99591	0.99600	0.99609	0.99618	0.99627
3.1	0.99635	0.99644	0.99652	0.99660	0.99668	0.99675	0.99682	0.99690	0.99697	0.99704
3.2	0.99710	0.99717	0.99723	0.99730	0.99736	0.99742	0.99748	0.99754	0.99759	0.99765
3.3	0.99770	0.99775	0.99780	0.99785	0.99790	0.99795	0.99800	0.99804	0.99809	0.99813
3.4	0.99817	0.99822	0.99826	0.99830	0.99833	0.99837	0.99841	0.99845	0.99848	0.99852
3.5	0.99855	0.99858	0.99862	0.99865	0.99868	0.99871	0.99874	0.99877	0.99879	0.99882
3.6	0.99885	0.99888	0.99890	0.99893	0.99895	0.99897	0.99900	0.99902	0.99904	0.99907
3.7	0.99909	0.99911	0.99913	0.99915	0.99917	0.99919	0.99921	0.99922	0.99924	0.99926
3.8	0.99928	0.99929	0.99931	0.99932	0.99934	0.99936	0.99937	0.99938	0.99940	0.99941
3.9	0.99943	0.99944	0.99945	0.99946	0.99948	0.99949	0.99950	0.99951	0.99952	0.99953
4.0	0.99955	0.99956	0.99957	0.99958	0.99959	0.99960	0.99960	0.99961	0.99962	0.99963
4.1	0.99964	0.99965	0.99966	0.99966	0.99967	0.99968	0.99969	0.99969	0.99970	0.99971
4.2	0.99971	0.99972	0.99973	0.99973	0.99974	0.99975	0.99975	0.99976	0.99976	0.99977
4.3	0.99977	0.99978	0.99978	0.99979	0.99979	0.99980	0.99980	0.99981	0.99981	0.99982
4.4	0.99982	0.99983	0.99983	0.99983	0.99984	0.99984	0.99985	0.99985	0.99985	0.99986
4.5	0.99986	0.99986	0.99987	0.99987	0.99987	0.99987	0.99988	0.99988	0.99988	0.99989
4.6	0.99989	0.99989	0.99989	0.99990	0.99990	0.99990	0.99990	0.99991	0.99991	0.99991
4.7	0.99991	0.99991	0.99992	0.99992	0.99992	0.99992	0.99992	0.99993	0.99993	0.99993
4.8	0.99993	0.99993	0.99993	0.99994	0.99994	0.99994	0.99994	0.99994	0.99994	0.99994
4.9	0.99995	0.99995	0.99995	0.99995	0.99995	0.99995	0.99995	0.99995	0.99996	0.99996
5.0	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99996	0.99997
5.1	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997	0.99997
5.2	0.99997	0.99997	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998
5.3	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998	0.99998
5.4	0.99998	0.99998	0.99998	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999	0.99999

Таблиця Д.5 – Коефіцієнт варіації v=0.6

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.00000	0.00001	0.00002	0.00005	0.00012	0.00023	0.00041	0.00070	0.00111	0.00168
0.2	0.00245	0.00344	0.00469	0.00623	0.00807	0.01023	0.01275	0.01562	0.01887	0.02249
0.3	0.02649	0.03086	0.03562	0.04074	0.04622	0.05205	0.05823	0.06473	0.07154	0.07865
0.4	0.08604	0.09370	0.10162	0.10976	0.11812	0.12669	0.13543	0.14435	0.15342	0.16263
0.5	0.17197	0.18141	0.19095	0.20057	0.21026	0.22001	0.22981	0.23964	0.24950	0.25937
0.6	0.26925	0.27912	0.28898	0.29883	0.30865	0.31843	0.32817	0.33787	0.34752	0.35711
0.7	0.36664	0.37610	0.38549	0.39481	0.40405	0.41321	0.42228	0.43127	0.44017	0.44898
0.8	0.45770	0.46632	0.47484	0.48327	0.49160	0.49983	0.50795	0.51598	0.52390	0.53173
0.9	0.53945	0.54706	0.55458	0.56199	0.56929	0.57650	0.58360	0.59061	0.59751	0.60430
1.0	0.61100	0.61760	0.62410	0.63050	0.63681	0.64302	0.64913	0.65514	0.66107	0.66690
1.1	0.67263	0.67828	0.68383	0.68930	0.69468	0.69997	0.70517	0.71029	0.71532	0.72028
1.2	0.72515	0.72994	0.73464	0.73928	0.74383	0.74830	0.75271	0.75703	0.76129	0.76547
1.3	0.76958	0.77362	0.77759	0.78149	0.78533	0.78910	0.79280	0.79644	0.80002	0.80353
1.4	0.80699	0.81038	0.81372	0.81700	0.82022	0.82338	0.82649	0.82955	0.83255	0.83550
1.5	0.83840	0.84124	0.84404	0.84679	0.84948	0.85213	0.85474	0.85730	0.85981	0.86228
1.6	0.86471	0.86709	0.86943	0.87173	0.87399	0.87620	0.87838	0.88052	0.88262	0.88469
1.7	0.88672	0.88871	0.89067	0.89259	0.89448	0.89633	0.89815	0.89994	0.90170	0.90343
1.8	0.90512	0.90679	0.90842	0.91003	0.91161	0.91316	0.91468	0.91618	0.91765	0.91909
1.9	0.92051	0.92190	0.92327	0.92461	0.92593	0.92722	0.92850	0.92975	0.93097	0.93218
2.0	0.93336	0.93453	0.93567	0.93679	0.93790	0.93898	0.94004	0.94109	0.94212	0.94312
2.1	0.94411	0.94509	0.94604	0.94698	0.94790	0.94881	0.94970	0.95057	0.95143	0.95227
2.2	0.95310	0.95392	0.95472	0.95550	0.95627	0.95703	0.95777	0.95851	0.95922	0.95993
2.3	0.96062	0.96130	0.96197	0.96263	0.96328	0.96391	0.96453	0.96515	0.96575	0.96634
2.4	0.96692	0.96749	0.96805	0.96860	0.96914	0.96967	0.97019	0.97071	0.97121	0.97170
2.5	0.97219	0.97267	0.97314	0.97360	0.97405	0.97450	0.97493	0.97536	0.97579	0.97620
2.6	0.97661	0.97701	0.97740	0.97779	0.97817	0.97854	0.97891	0.97927	0.97962	0.97997
2.7	0.98031	0.98065	0.98098	0.98130	0.98162	0.98194	0.98224	0.98255	0.98284	0.98314
2.8	0.98342	0.98371	0.98398	0.98425	0.98452	0.98479	0.98504	0.98530	0.98555	0.98579
2.9	0.98603	0.98627	0.98650	0.98673	0.98696	0.98718	0.98739	0.98761	0.98782	0.98802
3.0	0.98823	0.98843	0.98862	0.98881	0.98900	0.98919	0.98937	0.98955	0.98973	0.98990
3.1	0.99007	0.99024	0.99040	0.99056	0.99072	0.99088	0.99103	0.99118	0.99133	0.99148
3.2	0.99162	0.99176	0.99190	0.99204	0.99217	0.99230	0.99243	0.99256	0.99268	0.99281
3.3	0.99293	0.99304	0.99316	0.99328	0.99339	0.99350	0.99361	0.99372	0.99382	0.99392
3.4	0.99403	0.99413	0.99422	0.99432	0.99441	0.99451	0.99460	0.99469	0.99478	0.99487
3.5	0.99495	0.99504	0.99512	0.99520	0.99528	0.99536	0.99544	0.99551	0.99559	0.99566
3.6	0.99573	0.99580	0.99587	0.99594	0.99601	0.99608	0.99614	0.99621	0.99627	0.99633
3.7	0.99639	0.99645	0.99651	0.99657	0.99663	0.99668	0.99674	0.99679	0.99684	0.99690
3.8	0.99695	0.99700	0.99705	0.99710	0.99714	0.99719	0.99724	0.99728	0.99733	0.99737
3.9	0.99742	0.99746	0.99750	0.99754	0.99758	0.99762	0.99766	0.99770	0.99774	0.99778
4.0	0.99781	0.99785	0.99788	0.99792	0.99795	0.99799	0.99802	0.99805	0.99809	0.99812
4.1	0.99815	0.99818	0.99821	0.99824	0.99827	0.99830	0.99832	0.99835	0.99838	0.99841
4.2	0.99843	0.99846	0.99848	0.99851	0.99853	0.99856	0.99858	0.99860	0.99863	0.99865
4.3	0.99867	0.99869	0.99871	0.99874	0.99876	0.99878	0.99880	0.99882	0.99884	0.99886
4.4	0.99887	0.99889	0.99891	0.99893	0.99895	0.99896	0.99898	0.99900	0.99901	0.99903
4.5	0.99905	0.99906	0.99908	0.99909	0.99911	0.99912	0.99914	0.99915	0.99916	0.99918
4.6	0.99919	0.99920	0.99922	0.99923	0.99924	0.99926	0.99927	0.99928	0.99929	0.99930
4.7	0.99931	0.99933	0.99934	0.99935	0.99936	0.99937	0.99938	0.99939	0.99940	0.99941
4.8	0.99942	0.99943	0.99944	0.99945	0.99946	0.99946	0.99947	0.99948	0.99949	0.99950
4.9	0.99951	0.99951	0.99952	0.99953	0.99954	0.99955	0.99955	0.99956	0.99957	0.99957
5.0	0.99958	0.99959	0.99960	0.99960	0.99961	0.99961	0.99962	0.99963	0.99963	0.99964
5.1	0.99965	0.99965	0.99966	0.99966	0.99967	0.99967	0.99968	0.99968	0.99969	0.99969
5.2	0.99970	0.99970	0.99971	0.99971	0.99972	0.99972	0.99973	0.99973	0.99974	0.99974
5.3	0.99974	0.99975	0.99975	0.99976	0.99976	0.99976	0.99977	0.99977	0.99978	0.99978
5.4	0.99978	0.99979	0.99979	0.99979	0.99980	0.99980	0.99980	0.99981	0.99981	0.99981
5.5	0.99982	0.99982	0.99982	0.99983	0.99983	0.99983	0.99983	0.99984	0.99984	0.99984

Таблиця Д.6 – Коефіцієнт варіації v=0.7

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001
0.1	0.00004	0.00012	0.00026	0.00051	0.00092	0.00152	0.00237	0.00352	0.00499	0.00683
0.2	0.00906	0.01170	0.01477	0.01827	0.02222	0.02659	0.03139	0.03661	0.04223	0.04823
0.3	0.05461	0.06133	0.06838	0.07573	0.08338	0.09128	0.09943	0.10780	0.11637	0.12513
0.4	0.13404	0.14310	0.15229	0.16159	0.17099	0.18046	0.19000	0.19959	0.20922	0.21887
0.5	0.22855	0.23823	0.24790	0.25756	0.26720	0.27682	0.28639	0.29593	0.30542	0.31485
0.6	0.32422	0.33353	0.34277	0.35194	0.36103	0.37004	0.37897	0.38782	0.39658	0.40525
0.7	0.41383	0.42232	0.43071	0.43901	0.44722	0.45532	0.46333	0.47125	0.47906	0.48678
0.8	0.49440	0.50192	0.50934	0.51666	0.52388	0.53101	0.53804	0.54497	0.55181	0.55855
0.9	0.56520	0.57175	0.57821	0.58458	0.59085	0.59704	0.60313	0.60913	0.61505	0.62088
1.0	0.62662	0.63228	0.63785	0.64334	0.64874	0.65407	0.65931	0.66448	0.66956	0.67457
1.1	0.67950	0.68436	0.68914	0.69385	0.69849	0.70305	0.70755	0.71197	0.71633	0.72062
1.2	0.72484	0.72900	0.73310	0.73713	0.74109	0.74500	0.74884	0.75263	0.75635	0.76002
1.3	0.76363	0.76719	0.77069	0.77413	0.77752	0.78086	0.78415	0.78738	0.79057	0.79370
1.4	0.79679	0.79983	0.80282	0.80576	0.80866	0.81151	0.81432	0.81708	0.81981	0.82248
1.5	0.82512	0.82772	0.83028	0.83279	0.83527	0.83771	0.84011	0.84247	0.84480	0.84709
1.6	0.84935	0.85157	0.85376	0.85591	0.85803	0.86012	0.86217	0.86419	0.86618	0.86815
1.7	0.87008	0.87198	0.87385	0.87569	0.87751	0.87930	0.88106	0.88279	0.88449	0.88617
1.8	0.88783	0.88946	0.89106	0.89264	0.89420	0.89573	0.89724	0.89873	0.90019	0.90163
1.9	0.90305	0.90445	0.90582	0.90718	0.90852	0.90983	0.91113	0.91240	0.91366	0.91490
2.0	0.91612	0.91732	0.91850	0.91966	0.92081	0.92194	0.92305	0.92415	0.92523	0.92630
2.1	0.92734	0.92838	0.92939	0.93039	0.93138	0.93235	0.93331	0.93426	0.93519	0.93610
2.2	0.93700	0.93789	0.93877	0.93963	0.94048	0.94132	0.94214	0.94296	0.94376	0.94455
2.3	0.94533	0.94609	0.94685	0.94759	0.94832	0.94905	0.94976	0.95046	0.95115	0.95183
2.4	0.95250	0.95317	0.95382	0.95446	0.95509	0.95572	0.95633	0.95694	0.95753	0.95812
2.5	0.95870	0.95927	0.95984	0.96039	0.96094	0.96148	0.96201	0.96253	0.96305	0.96356
2.6	0.96406	0.96455	0.96504	0.96552	0.96599	0.96646	0.96692	0.96737	0.96782	0.96826
2.7	0.96869	0.96912	0.96954	0.96996	0.97037	0.97077	0.97117	0.97156	0.97195	0.97233
2.8	0.97271	0.97308	0.97345	0.97381	0.97416	0.97451	0.97486	0.97520	0.97553	0.97586
2.9	0.97619	0.97651	0.97683	0.97714	0.97745	0.97776	0.97806	0.97835	0.97864	0.97893
3.0	0.97921	0.97949	0.97977	0.98004	0.98031	0.98057	0.98083	0.98109	0.98134	0.98159
3.1	0.98184	0.98208	0.98232	0.98256	0.98279	0.98302	0.98325	0.98347	0.98369	0.98391
3.2	0.98412	0.98433	0.98454	0.98475	0.98495	0.98515	0.98535	0.98554	0.98573	0.98592
3.3	0.98611	0.98629	0.98647	0.98665	0.98683	0.98700	0.98718	0.98734	0.98751	0.98768
3.4	0.98784	0.98800	0.98816	0.98831	0.98847	0.98862	0.98877	0.98892	0.98906	0.98921
3.5	0.98935	0.98949	0.98963	0.98976	0.98990	0.99003	0.99016	0.99029	0.99041	0.99054
3.6	0.99066	0.99079	0.99091	0.99102	0.99114	0.99126	0.99137	0.99148	0.99159	0.99170
3.7	0.99181	0.99192	0.99202	0.99213	0.99223	0.99233	0.99243	0.99253	0.99263	0.99272
3.8	0.99282	0.99291	0.99300	0.99309	0.99318	0.99327	0.99336	0.99344	0.99353	0.99361
3.9	0.99369	0.99377	0.99386	0.99393	0.99401	0.99409	0.99417	0.99424	0.99432	0.99439
4.0	0.99446	0.99453	0.99460	0.99467	0.99474	0.99481	0.99487	0.99494	0.99501	0.99507
4.1	0.99513	0.99520	0.99526	0.99532	0.99538	0.99544	0.99549	0.99555	0.99561	0.99567
4.2	0.99572	0.99578	0.99583	0.99588	0.99594	0.99599	0.99604	0.99609	0.99614	0.99619
4.3	0.99624	0.99628	0.99633	0.99638	0.99642	0.99647	0.99652	0.99656	0.99660	0.99665
4.4	0.99669	0.99673	0.99677	0.99681	0.99685	0.99689	0.99693	0.99697	0.99701	0.99705
4.5	0.99709	0.99712	0.99716	0.99719	0.99723	0.99727	0.99730	0.99733	0.99737	0.99740
4.6	0.99743	0.99747	0.99750	0.99753	0.99756	0.99759	0.99762	0.99765	0.99768	0.99771
4.7	0.99774	0.99777	0.99780	0.99782	0.99785	0.99788	0.99790	0.99793	0.99796	0.99798
4.8	0.99801	0.99803	0.99806	0.99808	0.99811	0.99813	0.99815	0.99818	0.99820	0.99822
4.9	0.99824	0.99827	0.99829	0.99831	0.99833	0.99835	0.99837	0.99839	0.99841	0.99843
5.0	0.99845	0.99847	0.99849	0.99851	0.99853	0.99855	0.99856	0.99858	0.99860	0.99862
5.1	0.99863	0.99865	0.99867	0.99868	0.99870	0.99872	0.99873	0.99875	0.99876	0.99878
5.2	0.99880	0.99881	0.99883	0.99884	0.99885	0.99887	0.99888	0.99890	0.99891	0.99892
5.3	0.99894	0.99895	0.99896	0.99898	0.99899	0.99900	0.99901	0.99903	0.99904	0.99905
5.4	0.99906	0.99907	0.99908	0.99910	0.99911	0.99912	0.99913	0.99914	0.99915	0.99916
5.5	0.99917	0.99918	0.99919	0.99920	0.99921	0.99922	0.99923	0.99924	0.99925	0.99926

Таблиця Д.7 – Коефіцієнт варіації v=0.8

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00005	0.00014
0.1	0.00035	0.00073	0.00136	0.00230	0.00363	0.00539	0.00763	0.01037	0.01363	0.01742
0.2	0.02174	0.02657	0.03190	0.03771	0.04396	0.05064	0.05771	0.06514	0.07291	0.08098
0.3	0.08932	0.09791	0.10672	0.11572	0.12489	0.13420	0.14364	0.15318	0.16280	0.17249
0.4	0.18223	0.19200	0.20180	0.21160	0.22139	0.23118	0.24093	0.25065	0.26033	0.26997
0.5	0.27954	0.28905	0.29849	0.30786	0.31716	0.32637	0.33550	0.34453	0.35348	0.36234
0.6	0.37110	0.37976	0.38833	0.39679	0.40516	0.41342	0.42158	0.42964	0.43760	0.44545
0.7	0.45321	0.46086	0.46840	0.47585	0.48319	0.49044	0.49758	0.50463	0.51157	0.51842
0.8	0.52517	0.53182	0.53838	0.54485	0.55122	0.55750	0.56368	0.56978	0.57579	0.58171
0.9	0.58754	0.59329	0.59895	0.60453	0.61003	0.61544	0.62078	0.62603	0.63121	0.63631
1.0	0.64133	0.64628	0.65116	0.65596	0.66069	0.66536	0.66995	0.67447	0.67893	0.68332
1.1	0.68764	0.69190	0.69610	0.70023	0.70430	0.70832	0.71227	0.71616	0.72000	0.72378
1.2	0.72750	0.73117	0.73478	0.73835	0.74185	0.74531	0.74872	0.75207	0.75538	0.75864
1.3	0.76185	0.76501	0.76813	0.77120	0.77423	0.77721	0.78015	0.78305	0.78591	0.78872
1.4	0.79149	0.79423	0.79692	0.79958	0.80219	0.80477	0.80732	0.80982	0.81229	0.81473
1.5	0.81713	0.81949	0.82183	0.82412	0.82639	0.82863	0.83083	0.83300	0.83514	0.83725
1.6	0.83933	0.84139	0.84341	0.84541	0.84737	0.84931	0.85123	0.85311	0.85497	0.85681
1.7	0.85861	0.86040	0.86216	0.86389	0.86560	0.86729	0.86895	0.87060	0.87221	0.87381
1.8	0.87539	0.87694	0.87847	0.87998	0.88147	0.88294	0.88439	0.88583	0.88724	0.88863
1.9	0.89000	0.89136	0.89270	0.89402	0.89532	0.89660	0.89787	0.89912	0.90035	0.90157
2.0	0.90277	0.90396	0.90513	0.90628	0.90742	0.90854	0.90965	0.91074	0.91182	0.91289
2.1	0.91394	0.91498	0.91600	0.91701	0.91801	0.91900	0.91997	0.92093	0.92187	0.92281
2.2	0.92373	0.92464	0.92554	0.92643	0.92730	0.92817	0.92902	0.92986	0.93070	0.93152
2.3	0.93233	0.93313	0.93392	0.93470	0.93547	0.93623	0.93698	0.93772	0.93845	0.93917
2.4	0.93988	0.94059	0.94128	0.94197	0.94265	0.94332	0.94398	0.94463	0.94528	0.94591
2.5	0.94654	0.94716	0.94777	0.94838	0.94898	0.94957	0.95015	0.95073	0.95129	0.95186
2.6	0.95241	0.95296	0.95350	0.95403	0.95456	0.95508	0.95560	0.95611	0.95661	0.95711
2.7	0.95760	0.95808	0.95856	0.95903	0.95950	0.95996	0.96041	0.96086	0.96131	0.96175
2.8	0.96218	0.96261	0.96303	0.96345	0.96386	0.96427	0.96467	0.96507	0.96547	0.96585
2.9	0.96624	0.96662	0.96699	0.96736	0.96773	0.96809	0.96845	0.96880	0.96915	0.96950
3.0	0.96984	0.97017	0.97051	0.97083	0.97116	0.97148	0.97180	0.97211	0.97242	0.97273
3.1	0.97303	0.97333	0.97362	0.97391	0.97420	0.97449	0.97477	0.97505	0.97532	0.97560
3.2	0.97586	0.97613	0.97639	0.97665	0.97691	0.97716	0.97741	0.97766	0.97791	0.97815
3.3	0.97839	0.97862	0.97886	0.97909	0.97932	0.97954	0.97976	0.97999	0.98020	0.98042
3.4	0.98063	0.98084	0.98105	0.98126	0.98146	0.98166	0.98186	0.98206	0.98225	0.98244
3.5	0.98263	0.98282	0.98301	0.98319	0.98337	0.98355	0.98373	0.98390	0.98407	0.98425
3.6	0.98442	0.98458	0.98475	0.98491	0.98507	0.98523	0.98539	0.98555	0.98570	0.98586
3.7	0.98601	0.98616	0.98630	0.98645	0.98660	0.98674	0.98688	0.98702	0.98716	0.98729
3.8	0.98743	0.98756	0.98769	0.98783	0.98795	0.98808	0.98821	0.98833	0.98846	0.98858
3.9	0.98870	0.98882	0.98894	0.98905	0.98917	0.98928	0.98940	0.98951	0.98962	0.98973
4.0	0.98984	0.98994	0.99005	0.99015	0.99026	0.99036	0.99046	0.99056	0.99066	0.99076
4.1	0.99085	0.99095	0.99104	0.99114	0.99123	0.99132	0.99141	0.99150	0.99159	0.99168
4.2	0.99177	0.99185	0.99194	0.99202	0.99210	0.99219	0.99227	0.99235	0.99243	0.99251
4.3	0.99258	0.99266	0.99274	0.99281	0.99289	0.99296	0.99303	0.99310	0.99318	0.99325
4.4	0.99332	0.99339	0.99345	0.99352	0.99359	0.99365	0.99372	0.99378	0.99385	0.99391
4.5	0.99397	0.99404	0.99410	0.99416	0.99422	0.99428	0.99434	0.99439	0.99445	0.99451
4.6	0.99457	0.99462	0.99468	0.99473	0.99478	0.99484	0.99489	0.99494	0.99499	0.99505
4.7	0.99510	0.99515	0.99520	0.99524	0.99529	0.99534	0.99539	0.99544	0.99548	0.99553
4.8	0.99557	0.99562	0.99566	0.99571	0.99575	0.99579	0.99584	0.99588	0.99592	0.99596
4.9	0.99600	0.99604	0.99608	0.99612	0.99616	0.99620	0.99624	0.99628	0.99631	0.99635
5.0	0.99639	0.99642	0.99646	0.99650	0.99653	0.99657	0.99660	0.99664	0.99667	0.99670
5.1	0.99674	0.99677	0.99680	0.99683	0.99687	0.99690	0.99693	0.99696	0.99699	0.99702
5.2	0.99705	0.99708	0.99711	0.99714	0.99717	0.99719	0.99722	0.99725	0.99728	0.99730
5.3	0.99733	0.99736	0.99738	0.99741	0.99744	0.99746	0.99749	0.99751	0.99754	0.99756
5.4	0.99759	0.99761	0.99763	0.99766	0.99768	0.99770	0.99773	0.99775	0.99777	0.99779
5.5	0.99782	0.99784	0.99786	0.99788	0.99790	0.99792	0.99794	0.99796	0.99798	0.99800

Таблиця Д.8 – Коефіцієнт варіації v=0.9

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00002	0.00009	0.00028	0.00070
0.1	0.00144	0.00262	0.00432	0.00661	0.00953	0.01310	0.01733	0.02220	0.02769	0.03376
0.2	0.04038	0.04750	0.05508	0.06307	0.07143	0.08012	0.08910	0.09833	0.10778	0.11741
0.3	0.12718	0.13708	0.14708	0.15715	0.16727	0.17742	0.18758	0.19775	0.20790	0.21801
0.4	0.22809	0.23812	0.24808	0.25798	0.26780	0.27754	0.28719	0.29675	0.30622	0.31558
0.5	0.32484	0.33400	0.34304	0.35198	0.36081	0.36952	0.37812	0.38661	0.39499	0.40325
0.6	0.41139	0.41943	0.42735	0.43515	0.44285	0.45043	0.45791	0.46527	0.47253	0.47968
0.7	0.48673	0.49366	0.50050	0.50723	0.51386	0.52040	0.52683	0.53316	0.53940	0.54555
0.8	0.55160	0.55756	0.56343	0.56922	0.57491	0.58052	0.58604	0.59148	0.59683	0.60211
0.9	0.60731	0.61242	0.61746	0.62243	0.62732	0.63213	0.63687	0.64155	0.64615	0.65068
1.0	0.65515	0.65955	0.66388	0.66815	0.67236	0.67650	0.68059	0.68461	0.68857	0.69248
1.1	0.69633	0.70012	0.70386	0.70754	0.71117	0.71475	0.71827	0.72175	0.72517	0.72855
1.2	0.73188	0.73516	0.73839	0.74158	0.74472	0.74782	0.75087	0.75388	0.75685	0.75977
1.3	0.76266	0.76551	0.76831	0.77108	0.77381	0.77650	0.77915	0.78177	0.78435	0.78689
1.4	0.78941	0.79188	0.79432	0.79673	0.79911	0.80146	0.80377	0.80605	0.80830	0.81052
1.5	0.81272	0.81488	0.81701	0.81912	0.82119	0.82324	0.82527	0.82726	0.82923	0.83118
1.6	0.83310	0.83499	0.83686	0.83870	0.84053	0.84232	0.84410	0.84585	0.84758	0.84928
1.7	0.85097	0.85263	0.85427	0.85589	0.85749	0.85907	0.86063	0.86217	0.86370	0.86520
1.8	0.86668	0.86815	0.86959	0.87102	0.87243	0.87382	0.87520	0.87656	0.87790	0.87922
1.9	0.88053	0.88183	0.88310	0.88436	0.88561	0.88684	0.88806	0.88926	0.89044	0.89162
2.0	0.89278	0.89392	0.89505	0.89617	0.89727	0.89836	0.89944	0.90050	0.90155	0.90259
2.1	0.90362	0.90463	0.90564	0.90663	0.90760	0.90857	0.90953	0.91047	0.91141	0.91233
2.2	0.91324	0.91414	0.91504	0.91592	0.91679	0.91765	0.91850	0.91934	0.92017	0.92099
2.3	0.92180	0.92261	0.92340	0.92418	0.92496	0.92573	0.92648	0.92723	0.92797	0.92871
2.4	0.92943	0.93015	0.93086	0.93156	0.93225	0.93293	0.93361	0.93428	0.93494	0.93559
2.5	0.93624	0.93688	0.93751	0.93814	0.93876	0.93937	0.93997	0.94057	0.94117	0.94175
2.6	0.94233	0.94290	0.94347	0.94403	0.94458	0.94513	0.94567	0.94621	0.94674	0.94726
2.7	0.94778	0.94830	0.94880	0.94931	0.94980	0.95029	0.95078	0.95126	0.95174	0.95221
2.8	0.95267	0.95313	0.95359	0.95404	0.95449	0.95493	0.95536	0.95580	0.95622	0.95665
2.9	0.95706	0.95748	0.95789	0.95829	0.95869	0.95909	0.95948	0.95987	0.96026	0.96064
3.0	0.96101	0.96139	0.96176	0.96212	0.96248	0.96284	0.96319	0.96354	0.96389	0.96423
3.1	0.96457	0.96491	0.96524	0.96557	0.96589	0.96622	0.96653	0.96685	0.96716	0.96747
3.2	0.96778	0.96808	0.96838	0.96868	0.96897	0.96926	0.96955	0.96983	0.97012	0.97039
3.3	0.97067	0.97094	0.97122	0.97148	0.97175	0.97201	0.97227	0.97253	0.97278	0.97304
3.4	0.97329	0.97353	0.97378	0.97402	0.97426	0.97450	0.97473	0.97497	0.97520	0.97542
3.5	0.97565	0.97587	0.97609	0.97631	0.97653	0.97675	0.97696	0.97717	0.97738	0.97759
3.6	0.97779	0.97799	0.97819	0.97839	0.97859	0.97878	0.97898	0.97917	0.97936	0.97954
3.7	0.97973	0.97991	0.98009	0.98027	0.98045	0.98063	0.98080	0.98098	0.98115	0.98132
3.8	0.98149	0.98165	0.98182	0.98198	0.98214	0.98230	0.98246	0.98262	0.98278	0.98293
3.9	0.98308	0.98324	0.98338	0.98353	0.98368	0.98383	0.98397	0.98411	0.98425	0.98439
4.0	0.98453	0.98467	0.98481	0.98494	0.98508	0.98521	0.98534	0.98547	0.98560	0.98573
4.1	0.98585	0.98598	0.98610	0.98622	0.98634	0.98647	0.98658	0.98670	0.98682	0.98694
4.2	0.98705	0.98716	0.98728	0.98739	0.98750	0.98761	0.98772	0.98783	0.98793	0.98804
4.3	0.98814	0.98825	0.98835	0.98845	0.98855	0.98865	0.98875	0.98885	0.98894	0.98904
4.4	0.98914	0.98923	0.98932	0.98942	0.98951	0.98960	0.98969	0.98978	0.98987	0.98996
4.5	0.99004	0.99013	0.99021	0.99030	0.99038	0.99047	0.99055	0.99063	0.99071	0.99079
4.6	0.99087	0.99095	0.99103	0.99110	0.99118	0.99125	0.99133	0.99140	0.99148	0.99155
4.7	0.99162	0.99170	0.99177	0.99184	0.99191	0.99198	0.99204	0.99211	0.99218	0.99225
4.8	0.99231	0.99238	0.99244	0.99251	0.99257	0.99263	0.99270	0.99276	0.99282	0.99288
4.9	0.99294	0.99300	0.99306	0.99312	0.99318	0.99324	0.99329	0.99335	0.99341	0.99346
5.0	0.99352	0.99357	0.99363	0.99368	0.99373	0.99379	0.99384	0.99389	0.99394	0.99399
5.1	0.99404	0.99409	0.99414	0.99419	0.99424	0.99429	0.99434	0.99438	0.99443	0.99448
5.2	0.99452	0.99457	0.99462	0.99466	0.99471	0.99475	0.99479	0.99484	0.99488	0.99492
5.3	0.99497	0.99501	0.99505	0.99509	0.99513	0.99517	0.99521	0.99525	0.99529	0.99533
5.4	0.99537	0.99541	0.99545	0.99548	0.99552	0.99556	0.99560	0.99563	0.99567	0.99570
5.5	0.99574	0.99577	0.99581	0.99584	0.99588	0.99591	0.99595	0.99598	0.99601	0.99605

Таблиця Д.9 – Коефіцієнт варіації v=1.0

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00002	0.00012	0.00042	0.00107	0.00225
0.1	0.00408	0.00667	0.01006	0.01429	0.01932	0.02513	0.03166	0.03885	0.04664	0.05497
0.2	0.06376	0.07296	0.08251	0.09234	0.10242	0.11270	0.12313	0.13369	0.14432	0.15501
0.3	0.16574	0.17647	0.18718	0.19786	0.20849	0.21907	0.22956	0.23998	0.25030	0.26051
0.4	0.27062	0.28062	0.29050	0.30026	0.30990	0.31940	0.32878	0.33803	0.34715	0.35613
0.5	0.36499	0.37371	0.38230	0.39076	0.39909	0.40729	0.41536	0.42330	0.43112	0.43882
0.6	0.44639	0.45384	0.46118	0.46839	0.47549	0.48248	0.48935	0.49611	0.50276	0.50931
0.7	0.51575	0.52208	0.52832	0.53445	0.54049	0.54642	0.55227	0.55802	0.56368	0.56925
0.8	0.57473	0.58012	0.58543	0.59066	0.59580	0.60087	0.60585	0.61076	0.61559	0.62035
0.9	0.62503	0.62964	0.63418	0.63865	0.64305	0.64739	0.65166	0.65586	0.66001	0.66409
1.0	0.66811	0.67207	0.67597	0.67981	0.68360	0.68733	0.69100	0.69463	0.69820	0.70171
1.1	0.70518	0.70860	0.71197	0.71529	0.71856	0.72179	0.72497	0.72810	0.73120	0.73424
1.2	0.73725	0.74021	0.74314	0.74602	0.74886	0.75166	0.75443	0.75716	0.75985	0.76250
1.3	0.76512	0.76770	0.77025	0.77276	0.77524	0.77769	0.78010	0.78248	0.78484	0.78716
1.4	0.78945	0.79171	0.79394	0.79614	0.79831	0.80045	0.80257	0.80466	0.80672	0.80876
1.5	0.81077	0.81276	0.81472	0.81665	0.81856	0.82045	0.82231	0.82415	0.82597	0.82776
1.6	0.82954	0.83129	0.83302	0.83472	0.83641	0.83808	0.83972	0.84135	0.84296	0.84454
1.7	0.84611	0.84766	0.84919	0.85070	0.85220	0.85367	0.85513	0.85657	0.85800	0.85940
1.8	0.86080	0.86217	0.86353	0.86487	0.86620	0.86751	0.86881	0.87009	0.87136	0.87261
1.9	0.87385	0.87507	0.87628	0.87748	0.87866	0.87983	0.88098	0.88213	0.88326	0.88437
2.0	0.88548	0.88657	0.88765	0.88872	0.88977	0.89082	0.89185	0.89287	0.89388	0.89488
2.1	0.89587	0.89685	0.89781	0.89877	0.89972	0.90065	0.90158	0.90249	0.90340	0.90429
2.2	0.90518	0.90606	0.90692	0.90778	0.90863	0.90947	0.91030	0.91112	0.91194	0.91274
2.3	0.91354	0.91433	0.91511	0.91588	0.91664	0.91740	0.91814	0.91888	0.91961	0.92034
2.4	0.92106	0.92177	0.92247	0.92316	0.92385	0.92453	0.92521	0.92587	0.92653	0.92719
2.5	0.92783	0.92847	0.92911	0.92973	0.93036	0.93097	0.93158	0.93218	0.93278	0.93337
2.6	0.93395	0.93453	0.93510	0.93567	0.93623	0.93679	0.93734	0.93788	0.93842	0.93896
2.7	0.93949	0.94001	0.94053	0.94104	0.94155	0.94206	0.94256	0.94305	0.94354	0.94402
2.8	0.94450	0.94498	0.94545	0.94591	0.94638	0.94683	0.94729	0.94773	0.94818	0.94862
2.9	0.94905	0.94949	0.94991	0.95034	0.95076	0.95117	0.95158	0.95199	0.95239	0.95279
3.0	0.95319	0.95358	0.95397	0.95435	0.95474	0.95511	0.95549	0.95586	0.95623	0.95659
3.1	0.95695	0.95731	0.95766	0.95801	0.95836	0.95870	0.95904	0.95938	0.95972	0.96005
3.2	0.96038	0.96070	0.96103	0.96135	0.96166	0.96198	0.96229	0.96260	0.96290	0.96320
3.3	0.96350	0.96380	0.96410	0.96439	0.96468	0.96496	0.96525	0.96553	0.96581	0.96608
3.4	0.96636	0.96663	0.96690	0.96717	0.96743	0.96769	0.96795	0.96821	0.96846	0.96872
3.5	0.96897	0.96922	0.96946	0.96971	0.96995	0.97019	0.97043	0.97066	0.97089	0.97113
3.6	0.97136	0.97158	0.97181	0.97203	0.97225	0.97247	0.97269	0.97291	0.97312	0.97333
3.7	0.97354	0.97375	0.97396	0.97416	0.97437	0.97457	0.97477	0.97496	0.97516	0.97535
3.8	0.97555	0.97574	0.97593	0.97612	0.97630	0.97649	0.97667	0.97685	0.97703	0.97721
3.9	0.97739	0.97756	0.97774	0.97791	0.97808	0.97825	0.97842	0.97858	0.97875	0.97891
4.0	0.97908	0.97924	0.97940	0.97956	0.97971	0.97987	0.98002	0.98018	0.98033	0.98048
4.1	0.98063	0.98078	0.98092	0.98107	0.98121	0.98136	0.98150	0.98164	0.98178	0.98192
4.2	0.98206	0.98219	0.98233	0.98246	0.98260	0.98273	0.98286	0.98299	0.98312	0.98324
4.3	0.98337	0.98350	0.98362	0.98375	0.98387	0.98399	0.98411	0.98423	0.98435	0.98447
4.4	0.98458	0.98470	0.98481	0.98493	0.98504	0.98515	0.98526	0.98537	0.98548	0.98559
4.5	0.98570	0.98580	0.98591	0.98602	0.98612	0.98622	0.98633	0.98643	0.98653	0.98663
4.6	0.98673	0.98683	0.98692	0.98702	0.98712	0.98721	0.98731	0.98740	0.98749	0.98759
4.7	0.98768	0.98777	0.98786	0.98795	0.98804	0.98812	0.98821	0.98830	0.98838	0.98847
4.8	0.98855	0.98864	0.98872	0.98880	0.98889	0.98897	0.98905	0.98913	0.98921	0.98929
4.9	0.98937	0.98944	0.98952	0.98960	0.98967	0.98975	0.98982	0.98990	0.98997	0.99004
5.0	0.99011	0.99019	0.99026	0.99033	0.99040	0.99047	0.99054	0.99061	0.99067	0.99074
5.1	0.99081	0.99087	0.99094	0.99101	0.99107	0.99113	0.99120	0.99126	0.99132	0.99139
5.2	0.99145	0.99151	0.99157	0.99163	0.99169	0.99175	0.99181	0.99187	0.99193	0.99199
5.3	0.99204	0.99210	0.99216	0.99221	0.99227	0.99232	0.99238	0.99243	0.99249	0.99254
5.4	0.99259	0.99265	0.99270	0.99275	0.99280	0.99285	0.99290	0.99295	0.99300	0.99305
5.5	0.99310	0.99315	0.99320	0.99325	0.99330	0.99334	0.99339	0.99344	0.99348	0.99353

Таблиця Д.10 – Коефіцієнт варіації v=1.1

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00011	0.00046	0.00132	0.00291	0.00541
0.1	0.00893	0.01348	0.01906	0.02559	0.03298	0.04116	0.05001	0.05945	0.06938	0.07971
0.2	0.09038	0.10131	0.11243	0.12371	0.13508	0.14652	0.15797	0.16942	0.18084	0.19220
0.3	0.20348	0.21467	0.22575	0.23672	0.24756	0.25827	0.26883	0.27925	0.28952	0.29963
0.4	0.30959	0.31940	0.32905	0.33854	0.34787	0.35705	0.36607	0.37494	0.38366	0.39223
0.5	0.40064	0.40891	0.41704	0.42502	0.43286	0.44057	0.44814	0.45557	0.46288	0.47005
0.6	0.47711	0.48403	0.49084	0.49753	0.50410	0.51056	0.51691	0.52314	0.52927	0.53530
0.7	0.54122	0.54704	0.55277	0.55839	0.56393	0.56937	0.57472	0.57998	0.58515	0.59024
0.8	0.59525	0.60017	0.60502	0.60978	0.61447	0.61909	0.62363	0.62810	0.63249	0.63682
0.9	0.64109	0.64528	0.64941	0.65348	0.65748	0.66142	0.66531	0.66913	0.67290	0.67661
1.0	0.68026	0.68386	0.68741	0.69090	0.69434	0.69774	0.70108	0.70437	0.70762	0.71082
1.1	0.71397	0.71708	0.72015	0.72317	0.72615	0.72909	0.73198	0.73484	0.73766	0.74044
1.2	0.74318	0.74588	0.74854	0.75117	0.75377	0.75633	0.75885	0.76134	0.76380	0.76623
1.3	0.76862	0.77098	0.77331	0.77562	0.77789	0.78013	0.78234	0.78452	0.78668	0.78881
1.4	0.79091	0.79299	0.79504	0.79706	0.79906	0.80103	0.80298	0.80490	0.80680	0.80868
1.5	0.81053	0.81237	0.81418	0.81596	0.81773	0.81947	0.82120	0.82290	0.82458	0.82624
1.6	0.82789	0.82951	0.83111	0.83270	0.83426	0.83581	0.83734	0.83886	0.84035	0.84183
1.7	0.84329	0.84473	0.84616	0.84757	0.84897	0.85035	0.85171	0.85306	0.85439	0.85571
1.8	0.85702	0.85831	0.85958	0.86084	0.86209	0.86332	0.86454	0.86575	0.86694	0.86812
1.9	0.86929	0.87044	0.87159	0.87272	0.87383	0.87494	0.87603	0.87712	0.87819	0.87925
2.0	0.88030	0.88133	0.88236	0.88338	0.88438	0.88538	0.88636	0.88733	0.88830	0.88925
2.1	0.89020	0.89113	0.89206	0.89297	0.89388	0.89477	0.89566	0.89654	0.89741	0.89827
2.2	0.89912	0.89997	0.90080	0.90163	0.90245	0.90326	0.90406	0.90486	0.90564	0.90642
2.3	0.90719	0.90796	0.90871	0.90946	0.91020	0.91094	0.91166	0.91238	0.91310	0.91380
2.4	0.91450	0.91520	0.91588	0.91656	0.91723	0.91790	0.91856	0.91921	0.91986	0.92050
2.5	0.92114	0.92177	0.92239	0.92301	0.92362	0.92423	0.92483	0.92542	0.92601	0.92660
2.6	0.92718	0.92775	0.92832	0.92888	0.92944	0.92999	0.93054	0.93108	0.93162	0.93215
2.7	0.93268	0.93320	0.93372	0.93423	0.93474	0.93524	0.93574	0.93624	0.93673	0.93722
2.8	0.93770	0.93818	0.93865	0.93912	0.93958	0.94005	0.94050	0.94096	0.94140	0.94185
2.9	0.94229	0.94273	0.94316	0.94359	0.94402	0.94444	0.94486	0.94527	0.94568	0.94609
3.0	0.94649	0.94689	0.94729	0.94768	0.94808	0.94846	0.94885	0.94923	0.94960	0.94998
3.1	0.95035	0.95072	0.95108	0.95144	0.95180	0.95215	0.95251	0.95286	0.95320	0.95355
3.2	0.95389	0.95422	0.95456	0.95489	0.95522	0.95555	0.95587	0.95619	0.95651	0.95683
3.3	0.95714	0.95745	0.95776	0.95806	0.95837	0.95867	0.95897	0.95926	0.95955	0.95985
3.4	0.96013	0.96042	0.96070	0.96098	0.96126	0.96154	0.96182	0.96209	0.96236	0.96263
3.5	0.96289	0.96316	0.96342	0.96368	0.96393	0.96419	0.96444	0.96469	0.96494	0.96519
3.6	0.96544	0.96568	0.96592	0.96616	0.96640	0.96663	0.96687	0.96710	0.96733	0.96756
3.7	0.96779	0.96801	0.96823	0.96846	0.96867	0.96889	0.96911	0.96932	0.96954	0.96975
3.8	0.96996	0.97016	0.97037	0.97058	0.97078	0.97098	0.97118	0.97138	0.97158	0.97177
3.9	0.97197	0.97216	0.97235	0.97254	0.97273	0.97291	0.97310	0.97328	0.97346	0.97364
4.0	0.97382	0.97400	0.97418	0.97436	0.97453	0.97470	0.97487	0.97504	0.97521	0.97538
4.1	0.97555	0.97571	0.97588	0.97604	0.97620	0.97636	0.97652	0.97668	0.97683	0.97699
4.2	0.97714	0.97730	0.97745	0.97760	0.97775	0.97790	0.97805	0.97819	0.97834	0.97848
4.3	0.97863	0.97877	0.97891	0.97905	0.97919	0.97933	0.97947	0.97960	0.97974	0.97987
4.4	0.98000	0.98014	0.98027	0.98040	0.98053	0.98066	0.98078	0.98091	0.98104	0.98116
4.5	0.98128	0.98141	0.98153	0.98165	0.98177	0.98189	0.98201	0.98213	0.98224	0.98236
4.6	0.98247	0.98259	0.98270	0.98281	0.98293	0.98304	0.98315	0.98326	0.98337	0.98347
4.7	0.98358	0.98369	0.98379	0.98390	0.98400	0.98411	0.98421	0.98431	0.98441	0.98451
4.8	0.98461	0.98471	0.98481	0.98491	0.98500	0.98510	0.98520	0.98529	0.98539	0.98548
4.9	0.98557	0.98566	0.98576	0.98585	0.98594	0.98603	0.98612	0.98621	0.98629	0.98638
5.0	0.98647	0.98655	0.98664	0.98672	0.98681	0.98689	0.98698	0.98706	0.98714	0.98722
5.1	0.98730	0.98738	0.98746	0.98754	0.98762	0.98770	0.98778	0.98785	0.98793	0.98801
5.2	0.98808	0.98816	0.98823	0.98831	0.98838	0.98845	0.98852	0.98860	0.98867	0.98874
5.3	0.98881	0.98888	0.98895	0.98902	0.98909	0.98916	0.98922	0.98929	0.98936	0.98942
5.4	0.98949	0.98956	0.98962	0.98968	0.98975	0.98981	0.98988	0.98994	0.99000	0.99006
5.5	0.99012	0.99019	0.99025	0.99031	0.99037	0.99043	0.99049	0.99054	0.99060	0.99066

Таблиця Д.11 – Коефіцієнт варіації v=1.2

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00006	0.00038	0.00132	0.00321	0.00629	0.01068
0.1	0.01637	0.02328	0.03128	0.04025	0.05003	0.06048	0.07148	0.08291	0.09468	0.10668
0.2	0.11886	0.13113	0.14346	0.15579	0.16808	0.18030	0.19242	0.20443	0.21630	0.22802
0.3	0.23958	0.25097	0.26218	0.27320	0.28405	0.29470	0.30516	0.31543	0.32552	0.33541
0.4	0.34512	0.35464	0.36398	0.37314	0.38212	0.39093	0.39956	0.40803	0.41633	0.42447
0.5	0.43245	0.44028	0.44796	0.45549	0.46287	0.47011	0.47721	0.48418	0.49102	0.49773
0.6	0.50431	0.51077	0.51711	0.52333	0.52944	0.53544	0.54133	0.54711	0.55278	0.55836
0.7	0.56384	0.56922	0.57450	0.57970	0.58480	0.58982	0.59475	0.59959	0.60436	0.60904
0.8	0.61365	0.61817	0.62263	0.62701	0.63131	0.63555	0.63972	0.64382	0.64786	0.65183
0.9	0.65574	0.65959	0.66338	0.66711	0.67078	0.67439	0.67795	0.68146	0.68491	0.68831
1.0	0.69166	0.69496	0.69821	0.70141	0.70457	0.70768	0.71075	0.71377	0.71674	0.71968
1.1	0.72257	0.72542	0.72824	0.73101	0.73374	0.73644	0.73910	0.74172	0.74431	0.74686
1.2	0.74938	0.75186	0.75431	0.75673	0.75911	0.76146	0.76379	0.76608	0.76834	0.77057
1.3	0.77278	0.77495	0.77710	0.77922	0.78131	0.78338	0.78542	0.78744	0.78943	0.79139
1.4	0.79333	0.79525	0.79714	0.79901	0.80086	0.80269	0.80449	0.80627	0.80803	0.80977
1.5	0.81149	0.81318	0.81486	0.81652	0.81816	0.81978	0.82138	0.82296	0.82452	0.82607
1.6	0.82760	0.82911	0.83060	0.83208	0.83354	0.83498	0.83641	0.83782	0.83921	0.84059
1.7	0.84196	0.84331	0.84464	0.84596	0.84727	0.84856	0.84984	0.85110	0.85235	0.85359
1.8	0.85481	0.85602	0.85722	0.85840	0.85958	0.86074	0.86188	0.86302	0.86414	0.86525
1.9	0.86635	0.86744	0.86852	0.86959	0.87064	0.87169	0.87272	0.87375	0.87476	0.87576
2.0	0.87676	0.87774	0.87871	0.87968	0.88063	0.88157	0.88251	0.88344	0.88435	0.88526
2.1	0.88616	0.88705	0.88793	0.88880	0.88967	0.89052	0.89137	0.89221	0.89304	0.89386
2.2	0.89468	0.89549	0.89629	0.89708	0.89787	0.89864	0.89941	0.90018	0.90093	0.90168
2.3	0.90242	0.90316	0.90389	0.90461	0.90532	0.90603	0.90673	0.90743	0.90812	0.90880
2.4	0.90948	0.91015	0.91081	0.91147	0.91212	0.91277	0.91341	0.91404	0.91467	0.91530
2.5	0.91591	0.91653	0.91713	0.91774	0.91833	0.91892	0.91951	0.92009	0.92067	0.92124
2.6	0.92180	0.92236	0.92292	0.92347	0.92402	0.92456	0.92510	0.92563	0.92616	0.92668
2.7	0.92720	0.92771	0.92822	0.92873	0.92923	0.92973	0.93022	0.93071	0.93120	0.93168
2.8	0.93215	0.93263	0.93310	0.93356	0.93402	0.93448	0.93493	0.93538	0.93583	0.93627
2.9	0.93671	0.93714	0.93758	0.93800	0.93843	0.93885	0.93927	0.93968	0.94009	0.94050
3.0	0.94090	0.94131	0.94170	0.94210	0.94249	0.94288	0.94326	0.94365	0.94402	0.94440
3.1	0.94477	0.94514	0.94551	0.94588	0.94624	0.94660	0.94695	0.94730	0.94766	0.94800
3.2	0.94835	0.94869	0.94903	0.94937	0.94970	0.95003	0.95036	0.95069	0.95101	0.95133
3.3	0.95165	0.95197	0.95228	0.95260	0.95290	0.95321	0.95352	0.95382	0.95412	0.95442
3.4	0.95471	0.95501	0.95530	0.95559	0.95587	0.95616	0.95644	0.95672	0.95700	0.95727
3.5	0.95755	0.95782	0.95809	0.95836	0.95862	0.95889	0.95915	0.95941	0.95967	0.95993
3.6	0.96018	0.96043	0.96068	0.96093	0.96118	0.96143	0.96167	0.96191	0.96215	0.96239
3.7	0.96263	0.96286	0.96309	0.96332	0.96355	0.96378	0.96401	0.96423	0.96446	0.96468
3.8	0.96490	0.96512	0.96533	0.96555	0.96576	0.96598	0.96619	0.96640	0.96660	0.96681
3.9	0.96701	0.96722	0.96742	0.96762	0.96782	0.96802	0.96821	0.96841	0.96860	0.96880
4.0	0.96899	0.96918	0.96936	0.96955	0.96974	0.96992	0.97010	0.97029	0.97047	0.97065
4.1	0.97082	0.97100	0.97118	0.97135	0.97152	0.97170	0.97187	0.97204	0.97220	0.97237
4.2	0.97254	0.97270	0.97287	0.97303	0.97319	0.97335	0.97351	0.97367	0.97383	0.97398
4.3	0.97414	0.97429	0.97445	0.97460	0.97475	0.97490	0.97505	0.97520	0.97534	0.97549
4.4	0.97564	0.97578	0.97592	0.97607	0.97621	0.97635	0.97649	0.97663	0.97676	0.97690
4.5	0.97704	0.97717	0.97730	0.97744	0.97757	0.97770	0.97783	0.97796	0.97809	0.97822
4.6	0.97835	0.97847	0.97860	0.97872	0.97885	0.97897	0.97909	0.97921	0.97933	0.97945
4.7	0.97957	0.97969	0.97981	0.97992	0.98004	0.98016	0.98027	0.98038	0.98050	0.98061
4.8	0.98072	0.98083	0.98094	0.98105	0.98116	0.98127	0.98137	0.98148	0.98159	0.98169
4.9	0.98180	0.98190	0.98200	0.98211	0.98221	0.98231	0.98241	0.98251	0.98261	0.98271
5.0	0.98281	0.98291	0.98300	0.98310	0.98319	0.98329	0.98338	0.98348	0.98357	0.98366
5.1	0.98376	0.98385	0.98394	0.98403	0.98412	0.98421	0.98430	0.98439	0.98447	0.98456
5.2	0.98465	0.98473	0.98482	0.98490	0.98499	0.98507	0.98516	0.98524	0.98532	0.98540
5.3	0.98548	0.98557	0.98565	0.98573	0.98581	0.98588	0.98596	0.98604	0.98612	0.98619
5.4	0.98627	0.98635	0.98642	0.98650	0.98657	0.98665	0.98672	0.98679	0.98687	0.98694
5.5	0.98701	0.98708	0.98715	0.98722	0.98730	0.98736	0.98743	0.98750	0.98757	0.98764

Таблиця Д.12 – Коефіцієнт варіації v=1.25

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001	0.00012	0.00065	0.00204	0.00465	0.00869	0.01419
0.1	0.02110	0.02926	0.03851	0.04867	0.05959	0.07110	0.08307	0.09538	0.10794	0.12065
0.2	0.13344	0.14626	0.15906	0.17178	0.18441	0.19691	0.20926	0.22144	0.23345	0.24526
0.3	0.25688	0.26829	0.27950	0.29050	0.30129	0.31187	0.32224	0.33240	0.34236	0.35211
0.4	0.36167	0.37103	0.38020	0.38918	0.39798	0.40659	0.41503	0.42330	0.43139	0.43932
0.5	0.44710	0.45471	0.46217	0.46948	0.47665	0.48367	0.49056	0.49731	0.50393	0.51042
0.6	0.51679	0.52303	0.52916	0.53517	0.54107	0.54686	0.55254	0.55811	0.56359	0.56896
0.7	0.57424	0.57942	0.58451	0.58951	0.59442	0.59925	0.60399	0.60865	0.61324	0.61774
0.8	0.62217	0.62652	0.63080	0.63501	0.63915	0.64322	0.64722	0.65116	0.65504	0.65886
0.9	0.66261	0.66631	0.66994	0.67352	0.67705	0.68052	0.68394	0.68730	0.69062	0.69388
1.0	0.69710	0.70026	0.70338	0.70646	0.70949	0.71248	0.71542	0.71832	0.72118	0.72399
1.1	0.72677	0.72951	0.73221	0.73487	0.73750	0.74009	0.74264	0.74516	0.74765	0.75010
1.2	0.75252	0.75490	0.75726	0.75958	0.76187	0.76414	0.76637	0.76857	0.77075	0.77289
1.3	0.77501	0.77711	0.77917	0.78121	0.78323	0.78522	0.78718	0.78912	0.79104	0.79293
1.4	0.79480	0.79664	0.79847	0.80027	0.80205	0.80381	0.80554	0.80726	0.80896	0.81063
1.5	0.81229	0.81393	0.81555	0.81715	0.81873	0.82029	0.82183	0.82336	0.82487	0.82636
1.6	0.82784	0.82930	0.83074	0.83217	0.83358	0.83497	0.83635	0.83772	0.83907	0.84040
1.7	0.84172	0.84303	0.84432	0.84560	0.84686	0.84811	0.84935	0.85057	0.85178	0.85298
1.8	0.85417	0.85534	0.85650	0.85765	0.85879	0.85991	0.86103	0.86213	0.86322	0.86430
1.9	0.86537	0.86643	0.86747	0.86851	0.86954	0.87055	0.87156	0.87255	0.87354	0.87452
2.0	0.87548	0.87644	0.87739	0.87832	0.87925	0.88017	0.88108	0.88199	0.88288	0.88376
2.1	0.88464	0.88551	0.88637	0.88722	0.88806	0.88890	0.88973	0.89055	0.89136	0.89216
2.2	0.89296	0.89375	0.89453	0.89531	0.89607	0.89683	0.89759	0.89833	0.89907	0.89981
2.3	0.90053	0.90125	0.90197	0.90268	0.90338	0.90407	0.90476	0.90544	0.90612	0.90679
2.4	0.90745	0.90811	0.90876	0.90941	0.91005	0.91068	0.91131	0.91194	0.91256	0.91317
2.5	0.91378	0.91438	0.91498	0.91557	0.91616	0.91674	0.91732	0.91789	0.91846	0.91902
2.6	0.91958	0.92013	0.92068	0.92122	0.92176	0.92230	0.92283	0.92335	0.92387	0.92439
2.7	0.92490	0.92541	0.92592	0.92642	0.92691	0.92741	0.92789	0.92838	0.92886	0.92933
2.8	0.92981	0.93027	0.93074	0.93120	0.93166	0.93211	0.93256	0.93301	0.93345	0.93389
2.9	0.93432	0.93476	0.93519	0.93561	0.93603	0.93645	0.93687	0.93728	0.93769	0.93809
3.0	0.93850	0.93889	0.93929	0.93968	0.94007	0.94046	0.94085	0.94123	0.94160	0.94198
3.1	0.94235	0.94272	0.94309	0.94345	0.94381	0.94417	0.94453	0.94488	0.94523	0.94558
3.2	0.94592	0.94626	0.94660	0.94694	0.94728	0.94761	0.94794	0.94827	0.94859	0.94891
3.3	0.94923	0.94955	0.94987	0.95018	0.95049	0.95080	0.95110	0.95141	0.95171	0.95201
3.4	0.95230	0.95260	0.95289	0.95318	0.95347	0.95376	0.95404	0.95432	0.95461	0.95488
3.5	0.95516	0.95543	0.95571	0.95598	0.95624	0.95651	0.95678	0.95704	0.95730	0.95756
3.6	0.95782	0.95807	0.95832	0.95858	0.95883	0.95907	0.95932	0.95957	0.95981	0.96005
3.7	0.96029	0.96053	0.96076	0.96100	0.96123	0.96146	0.96169	0.96192	0.96215	0.96237
3.8	0.96259	0.96282	0.96304	0.96326	0.96347	0.96369	0.96390	0.96412	0.96433	0.96454
3.9	0.96475	0.96495	0.96516	0.96536	0.96557	0.96577	0.96597	0.96617	0.96636	0.96656
4.0	0.96676	0.96695	0.96714	0.96733	0.96752	0.96771	0.96790	0.96808	0.96827	0.96845
4.1	0.96863	0.96881	0.96899	0.96917	0.96935	0.96953	0.96970	0.96988	0.97005	0.97022
4.2	0.97039	0.97056	0.97073	0.97089	0.97106	0.97123	0.97139	0.97155	0.97171	0.97188
4.3	0.97203	0.97219	0.97235	0.97251	0.97266	0.97282	0.97297	0.97312	0.97328	0.97343
4.4	0.97358	0.97372	0.97387	0.97402	0.97416	0.97431	0.97445	0.97460	0.97474	0.97488
4.5	0.97502	0.97516	0.97530	0.97544	0.97557	0.97571	0.97584	0.97598	0.97611	0.97624
4.6	0.97638	0.97651	0.97664	0.97677	0.97689	0.97702	0.97715	0.97728	0.97740	0.97753
4.7	0.97765	0.97777	0.97789	0.97802	0.97814	0.97826	0.97838	0.97849	0.97861	0.97873
4.8	0.97884	0.97896	0.97907	0.97919	0.97930	0.97942	0.97953	0.97964	0.97975	0.97986
4.9	0.97997	0.98008	0.98019	0.98029	0.98040	0.98051	0.98061	0.98072	0.98082	0.98092
5.0	0.98103	0.98113	0.98123	0.98133	0.98143	0.98153	0.98163	0.98173	0.98183	0.98192
5.1	0.98202	0.98212	0.98221	0.98231	0.98240	0.98250	0.98259	0.98268	0.98277	0.98287
5.2	0.98296	0.98305	0.98314	0.98323	0.98332	0.98340	0.98349	0.98358	0.98367	0.98375
5.3	0.98384	0.98392	0.98401	0.98409	0.98418	0.98426	0.98434	0.98443	0.98451	0.98459
5.4	0.98467	0.98475	0.98483	0.98491	0.98499	0.98507	0.98515	0.98523	0.98530	0.98538
5.5	0.98546	0.98553	0.98561	0.98568	0.98576	0.98583	0.98590	0.98598	0.98605	0.98612

Додаток Е

Елементний базис КІЗП «Благовіст»

Е.1 Елементний базис КІС «Благовіст»

Е.1.1 Колійні датчики проходу колеса

У системі використовуються колійні датчики проходження колеса вітчизняного виробництва ДПД-03 ТОВ «ДСКТБ СКАТ» (рис. Е.1).

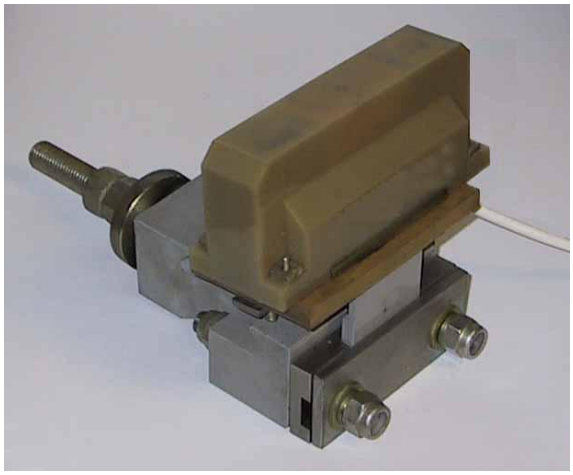


Рисунок Е.1 – Датчик проходу колеса ДПД-03

Технічні характеристики ДПД-03:

- напруга живлення + 18 ± 10% В;
- внутрішня частота генератора 36 ± 5% кГц;
- час готовності до роботи після подачі живлення не більше 30 с;
- струм споживання, не більше 80 мА;
- рівень вихідного сигналу датчика 7 ... 8,5 В.

Е.1.2 Інформаційне табло

Інформаційне табло зображено на рис. Е.2.

Рисунок Е.2 – Приклад інформаційного табло з написами

Технічні характеристики інформаційного табло:

- розміри 1500х900х100 мм;
- напруга живлення 220 В± 5%;
- інтерфейс підключення RS 485;
- колір світлодіода червоний, зелений, жовтий, блакитний, білий;
- рухома стрічка на 18 знаків;
- висота знакомісця 120 мм;
- розмір пікселя 8 мм;
- потужність 30 Вт;
- термін експлуатації світлодіодів до 100 000 годин;
- матеріал корпусу алюмінієво пластикова панель;
- рекомендована максимальна відстань огляду від 1 до 50 м;
- температурний діапазон експлуатації від -45 ° С до + 45 ° С.

Е 1.3 Радіомодулі

XBee-модулі S2B (рис. Е.3) володіють високими технічними параметрами і здатні передавати дані на відстань більше 3 км. Програмована версія дозволяє створювати функціонально насичені закінчені ZigBee-пристрої без застосування додаткового мікроконтролера.

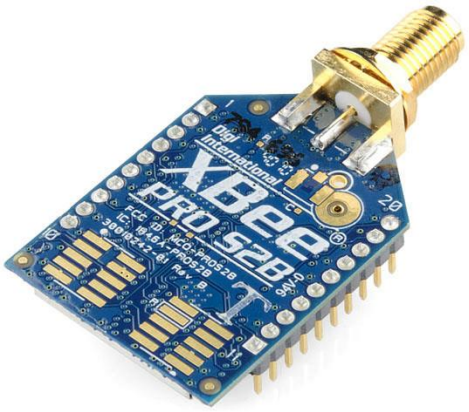


Рисунок Е.3 – Радіомодуль XBee PRO S2b

Технічні характеристики XBee S2C:

- система на кристалі, EM357;
- потужність передавача +18 дБм;
- чутливість приймача -101 дБм;
- інтерфейси для команд управління, UART, SPI;
- порти, 4 входи 12-біт АЦП, 16 конфігурованих GPIO;
- виконання антен, роз'єм U.FL;
- напруга живлення 2.7-3.6 В;
- споживання струму при максимальній потужності 100 мА;
- споживання струму в режимі сну 0.4 мкА.

Е.1.4 Антени

Технічні характеристики антени Yagi 2.4GHz 25dbi (рис. Е.4):

- частотний діпазон 2,4 ГГц;
- підсилення 25 dBi;
- розміри 500 х 90 мм;
- опір 50 Ом;
- максимальна потужність 1 Вт.

Рисунок Е.4 – Антенна Yagi 2.4GHz 25dbi

Е 1.5 Сонячні батареї

Зовнішній вид сонячної батареї ABi-Solar SR-M6044850 показаний на рис. Е.5.

Рисунок Е.5 – Зовнішній вид сонячної батареї ABi-Solar SR-M6044850

Технічні характеристики ABi-Solar SR-M6044850:

- потужність 50 Вт;
- тип елементів монокремній;
- напруга у відкритому ланцюзі 29.40 В;
- струм КЗ 2.27 А;
- напруга під навантаженням 23.90 В;
- робочий струм 2.09 А;
- вага модуля 4.6 кг;
- розміри (ДхВхШ) 670 х 545 х 35 мм.

Е 1.6 Джерела безперебійного живлення

Блок джерела безперебійного живлення PowerWalker VFD 600 IEC призначений для забезпечення підключення до нього електрообладнання для безперебійного постачання електричної енергії в межах норми і для збільшення часу режиму резервного живлення.

Зовнішній вигляд джерела безперебійного живлення PowerWalker VFD 600 IEC представлений на рис. Е.6.

Рисунок Е.6 – Зовнішній вигляд джерела безперебійного живлення PowerWalker VFD 600 IEC

Технічні характеристики PowerWalker VFD 600 IEC:

- потужність 480 Вт;
- номінальна напруга мережі 180 – 220 В, 50/60 Гц;
- час перемикання 2 – 4 мс;
- час режиму резервного живлення 30 – 60 хв.;
- припустимий температурний діапазон -35 ... + 75 ° С.