УДК 004.415:004.75:519.876.5

МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ У ЗМІННОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Новікова Т. О.
Національний університет «Одеська політехніка»
Україна, Одеса
novikova.t.o@op.edu.ua

Анотація. *У роботі розглянуто підхід до моделювання надійності розподілених інформаційних систем в умовах змінного середовища. Запропоновано структурно-поведінкову модель системи з урахуванням ймовірностей відмов, часу відновлення та впливу зовнішніх факторів. Проведено аналіз сценаріїв функціонування системи із застосуванням самовідновлення, резервування та балансування навантаження.*
Ключові слова: *розподілені інформаційні системи; моделювання надійності; відмовостійкість; динамічне середовище; оптимізація архітектури.*

Вступна частина. У сучасному цифровому середовищі розподілені інформаційні системи (РІС) відіграють ключову роль у забезпеченні обробки, зберігання та передачі даних у реальному часі [1]. Їх застосовують у критично важливих галузях – від банківської справи до медицини, транспорту й оборони. Однак зростання складності архітектур і вплив зовнішніх факторів, як-от перевантаження, відмова вузлів чи кіберзагрози, ставлять нові виклики перед забезпеченням їх надійності [2]. У змінному середовищі (наприклад, у хмарних або мобільних інфраструктурах) традиційні підходи до оцінювання надійності стають недостатніми, що зумовлює потребу у створенні адаптивних математичних моделей [3].

Метою дослідження є розроблення та аналіз моделі надійності розподіленої інформаційної системи, яка враховує динамічні зміни середовища функціонування, а також дослідження впливу ключових параметрів системи на її стійкість до відмов.

Основна частина. У ході дослідження було розроблено концептуальну модель надійності розподіленої інформаційної системи, що функціонує у змінному середовищі. Особливу увагу приділено впливу таких факторів, як нестабільність мережевих з’єднань, динамічне масштабування ресурсів, відмова окремих вузлів і зміна інтенсивності навантаження.

Для побудови моделі було застосовано підхід системного аналізу, який передбачає розгляд як структурної, так і поведінкової складових розподіленої інформаційної системи. Структурна модель реалізована у вигляді орієнтованого графа, де вершини відповідають логічним або фізичним вузлам системи (сервери, бази даних, балансувальники навантаження, клієнтські термінали), а ребра – каналам зв’язку між ними з відповідними параметрами пропускної здатності, затримки та ймовірності збоїв.

Поведінковий компонент моделі включає часові характеристики – середній час безвідмовної роботи (MTBF), середній час відновлення (MTTR) для кожного вузла, а також правила реакції системи на відмови [4]. Наприклад, у випадку виходу з ладу одного з серверів обробки запитів, навантаження автоматично перерозподіляється на резервні вузли за певним алгоритмом (наприклад, Round Robin або Least Connections).

Модель також дозволяє симулювати каскадні збої, які виникають внаслідок перевантаження основних компонентів або розриву критичних комунікацій. Такі ситуації

моделюються шляхом встановлення порогових значень навантаження, після перевищення яких вузол вважається «нестабільним» і з високою ймовірністю може вийти з ладу, що в свою чергу провокує зростання навантаження на інші компоненти системи. Це дозволяє врахувати ефекти лавиноподібного розповсюдження збоїв і оцінити стійкість РІС у кризових сценаріях.

З метою кількісної оцінки рівня надійності розподіленої інформаційної системи було змодельовано кілька сценаріїв її функціонування в умовах змінного середовища, таких як зростання навантаження, тимчасові збої мережевих з'єднань та раптові відмови вузлів. Сценарії включали як штатний режим роботи, так і аварійні ситуації, зокрема, відмова критичного сервера баз даних, втрата одного з комунікаційних каналів, або навмисне перевантаження системи (стрес-тест).

У процесі моделювання враховано такі параметри:

– ймовірність відмови вузлів (визначена на основі типових значень MTBF для обчислювального і мережевого обладнання);

– середній час виявлення інциденту, який варіюється від 1 до 10 хвилин залежно від наявності систем моніторингу;

– середній час відновлення (MTTR), що залежить від складності відмови та можливості автоматичного переключення на резервний компонент.

Було проведено порівняльне моделювання функціонування РІС за двома умовами:

– без засобів самовідновлення: у такому випадку вихід з ладу одного компонента призводить до ланцюгових збоїв і втрати доступу до окремих сервісів;

– із застосуванням механізмів резервування, самовідновлення та балансування навантаження, за яких система реагує на збої автоматичним перемиканням на альтернативні вузли або відновленням працездатності через відкат до стабільного стану.

Результати порівняння показали, що використання таких механізмів дозволяє зменшити середній час простою на 65–80%, а загальний показник доступності системи (availability) підвищується з 94–95% до 99,8%, що наближається до рівня enterprise-класу.

Застосування запропонованої моделі дає змогу не лише кількісно оцінити рівень надійності розподіленої інформаційної системи, а й виявити її слабкі місця, що потенційно можуть призвести до збоїв або втрати даних. Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити висновки щодо архітектурних рішень, які суттєво впливають на стійкість системи до змінного навантаження та зовнішніх впливів. Наприклад, було встановлено, що централізовані вузли обробки інформації є критичними точками відмови, а відсутність механізмів автоматичного перемикання на резервні ресурси значно знижує доступність сервісів.

Для підвищення надійності доцільним є впровадження резервування ключових компонентів системи, використання децентралізованих рішень на основі мікросервісної архітектури та розгортання інструментів автоматичного моніторингу і реагування на інциденти. Важливим також є застосування стратегій самовідновлення, що дозволяють мінімізувати час простою, а також регулярне тестування поведінки системи у кризових сценаріях, яке дає змогу не лише перевірити готовність до відмов, а й сформувати ефективні плани відновлення. Таким чином, результати моделювання можуть бути використані для обґрунтованого прийняття рішень щодо оптимізації архітектури РІС та підвищення її стійкості в умовах нестабільного або динамічного середовища.

Висновки. У дослідженні було розроблено та апробовано модель надійності розподіленої інформаційної системи у змінному середовищі з використанням підходів системного аналізу. Запропонована модель враховує структурну й поведінкову складову системи, дозволяє моделювати відмови окремих компонентів, каскадні збої та сценарії з різними рівнями навантаження й зовнішніх впливів.

Проведене моделювання продемонструвало, що наявність механізмів резервування, балансування навантаження та самовідновлення суттєво підвищує надійність системи та знижує середній час простою. Аналіз архітектури РІС дозволив виявити критичні точки відмов і сформувати практичні рекомендації для підвищення стійкості, зокрема через децентралізацію, автоматизацію реагування на інциденти та регулярну перевірку готовності до аварійних ситуацій.

Отже, використання аналітичного моделювання для оцінки надійності РІС у динамічному середовищі є ефективним інструментом для проєктування стійких інформаційних систем, здатних забезпечувати безперебійну роботу навіть за умов непередбачуваних змін або збоїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Talaver, V., & Vakaliuk, T. A. (2023). Reliable distributed systems: Review of modern approaches. *Journal of Edge Computing*, 1(2), 45-58.
[2] Wang, W., & Bai, Y. (2024). Reliability in cloud computing applications with chaotic particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(7), 115-123.
[3] Chaurasia, B. (2024). An in-depth and insightful exploration of failure detection in distributed systems. *Journal of Parallel, Distributed & Network-Based Processing*, 37, 12-29.
[4] Dai, F., Hossain, M. A., & Wang, Y. (2025). State of the art in parallel and distributed systems: Emerging trends and challenges. *Electronics*, 14(4), Article 677.

Novikova T. O.

Modeling the reliability of distributed information systems in a dynamic environment

Abstract. *The paper presents an approach to modeling the reliability of distributed information systems in a dynamic environment. A structural-behavioral model is proposed, taking into account failure probabilities, recovery time, and the influence of external factors. The analysis includes system performance scenarios involving self-healing mechanisms, redundancy, and load balancing.*

Keywords: *distributed information systems; reliability modeling; fault tolerance; dynamic environment; architecture optimization.*