

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ КОМЕРЦІЙНИХ МІКРОСХЕМ У МІСІЯХ НА НИЗЬКИХ НАВКОЛОЗЕМНИХ ОРБИТАХ

Стан проблеми. Сучасна космічна промисловість перебуває на етапі перебудови, спрямована на зниження вартості та скорочення часу розробки апаратів. Традиційні Rad-Hard компоненти, стійкі до радіації та екстремальних умов, поступово замінюються дешевими й продуктивними COTS елементами.

Постановка задачі. Забезпечити надійну роботу COTS-компонентів, зокрема ПЛІС, у радіаційно небезпечному середовищі космосу шляхом розробки методів захисту, дублювання, контролю та автоматичного відновлення конфігурацій.

Наукова новизна. Полягає у формуванні підходу до підвищення відмовостійкості COTS-компонентів на основі програмних і апаратних методів самодіагностики та часткового перепрограмування ПЛІС у польоті. Такий підхід компенсує деградацію мікросхем від іонізуючого випромінювання, відновлюючи працездатність без втручання із Землі.

Розв'язання задачі. Починаючи з 2004 року, проект космічної обсерваторії “Swift” використовував близько 40% COTS компонентів, і з того часу їх частка постійно зростала. Після 2013 року компанії, зокрема SpaceX, почали застосовувати переважно COTS-елементи, а місії Swift, SpaceCube, Ingenuity довели їхню надійність [3]. За умови правильного проектування та використання захисту, рівень відмов не перевищує показник Rad-Hard компонентів. Завдяки цьому витрати на розробку, як у випадку Falcon 9, виявилися значно нижчими від очікуваних NASA [1].

Простір навколо Землі насичений іонізуючим випромінюванням – сонячними потоками, галактичними променями, радіаційними поясами Ван Аллена. Між ними знаходиться зона низької радіації, придатна для орбіт зв'язку, тоді як малі супутники зазвичай працюють на низькій орбіті, уникаючи Південно-Атлантичної аномалії [2]. Більшість COTS-компонентів не розраховані на такі умови, їх підбирають відповідно до потреб і ретельно перевіряють на стійкість до температури, тиску, збоїв та радіації, що забезпечує надійну роботу в космосі [3], [2].

Через це особливе місце серед COTS-компонентів займають ПЛІС, які поєднують гнучкість програмного забезпечення з апаратною продуктивністю. Завдяки можливості створення нової топології кристала, ПЛІС здатні частково перепрограмуватися в польоті, оминаючи області, пошкодженні космічним випромінюванням, що надає системам властивості переналаштування [5]. Прикладом є «Січ 2» та «Січ 2-30», у яких ПЛІС використовувалися у складі СЗНІ. Використання реконфігурованих елементів дозволило зменшити

габарити СЗНІ, підвищити надійність і забезпечити можливість перепрограмування мікромодулів під різні задачі [6]. Іонізуюче випромінювання впливає на мікросхеми різними шляхами: кумулятивний ефект, також виникають ефекти від частинкового влучання, до них відносяться зміни біта в пам'яті або регістрі, виникнення паразитного струмового каналу, незворотне пошкодження елемента або структурні зміни кристалу через зіткнення високоенергетичних частинок [5]. Для підвищення стійкості ПЛІС, застосовують спеціальні стратегії: дублювання критичних блоків, регулярне очищення конфігураційних бітів, та алгоритми виявлення та корекції помилок, роблячи ПЛІС одним з найперспективніших COTS рішень для гнучких, відмовостійких і довговічних космічних систем [4].

Висновки. Використання COTS – важливий напрям розвитку космічної промисловості, оскільки знижує вартість, і термін розробки та забезпечує доступ до технологій, недосяжних для Rad-Hard рішень. Завдяки вдосконаленим методам захисту, та ретельному тестуванню, COTS-компоненти демонструють свою надійність. У перспективі подальші дослідження повинні бути спрямовані на розробку методів робочого діагностування кристала ПЛІС для виявлення пошкоджених областей, що виникають під дією космічного випромінювання, а також на створення алгоритмів розробки нових конфігурацій і використання резервних, наперед підготовлених конфігурацій із можливістю автоматичного перепрограмування мікросхеми під час польоту. Реалізація цих підходів забезпечить підвищення відмовостійкості, автономності та тривалості функціонування систем, наблизивши їх до концепції самовідновлювальних обчислювальних машин, придатних для тривалих місій навіть у складних радіаційних умовах космосу.

ЛІТЕРАТУРА.

- [1]. An Assessment of Cost Improvements in the NASA COTS – URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170008894/downloads/20170008894.pdf>
- [2]. Steven L Hogan, Expanding Space Design Options Using COTS – URL: <https://www.researchgate.net/publication/379996722>
- [3]. Jesse Leitner, What do the data and experiences tell us? DOI: 10.13140/RG.2.2.25786.67528
- [4]. Youcef Bentoutou, Cost-effective fault-tolerant EDAC solution for SRAM-based FPGAs and memory in space applications - DOI:10.1016/j.micpro.2025.105208
- [5]. FPGA Mitigation Strategies for Critical Space Applications – URL <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20180006778/downloads/20180006778.pdf>

- [6]. В. С. Глухов, А. А. Лукенюк, С. Г. Шендерук МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПЛІС СИСТЕМИ ЗБОРУ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ - URL <https://old.tkea.com.ua/siet/archive/2013-t1/131.pdf>