

Ю. О. Литвин, А. С. Садовніков, Р. В. Самоделок, О. С. Проскурін

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

Методи тестування радіаційної стійкості компонентів робототехнічних комплексів

Ключові слова:

робототехнічний комплекс,
радіаційна стійкість,
тестування,
атомна енергетика.

Розглянуто методики тестування радіаційної стійкості електронних модулів і окремих компонентів, у тому числі напівпровідникових, що застосовуються у складі систем робототехнічних комплексів. Проведено огляд типових методик тестування електронних компонентів під впливом γ -випромінювання і нейтронного потоку, визначено стандарти, що можуть бути застосовані. Описано тестування радіаційної стійкості електронних компонентів і модулів, що проводиться за такими критеріями, як total ionizing dose (TID), neutron displacement damage (NDD), transient radiation effects (TRE) і single event effects (SEE). Наведено основні методи, що дають змогу захистити електронні пристрої від негативного впливу іонізуючого випромінювання, та заходи, які потрібно враховувати в процесі проектування радіаційно стійкого робототехнічного комплексу. Сформовано послідовність виконання тестів під час розробки робототехнічної системи. Визначено доцільність поетапного тестування окремих компонентів, модулів і систем у цілому для визначення граничних доз і кількості одиничних ефектів, що призводять до порушення нормальної роботи комплексу.

Вступ

Радіаційно стійкі робототехнічні комплекси та системи стали невід'ємною складовою робіт із ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС. Починаючи з 1986 р. з метою зменшення рівня опромінення персоналу застосовувались дистанційно керовані комплекси. Роботи використовувались для радіаційної розвідки, розбору завалів зруйнованих будівель та споруд, тимчасового захоронення радіоактивних матеріалів, але негативний вплив іонізуючого випромінювання нерідко ставав причиною виходу з ладу обладнання, електронних та електричних систем.

Сьогодні проблема досі залишається актуальною. Відділом дистанційних комплексів і технологій Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України (ІПБ АЕС НАН

України) періодично проводяться роботи за допомогою дистанційно керованих роботизованих систем у підпокрівельному просторі нового безпечного конфайнмента (НБК) об'єкта «Укриття» в безпосередній близькості до джерел іонізуючого випромінювання [4]. У майбутньому дистанційно керовані агрегати планується залучити до робіт з демонтажу будівельних конструкцій, вилучення та поводження з ядерними матеріалами об'єкта «Укриття», використовувати для зняття з експлуатації енергоблоків АЕС та під час інших робіт, що виконуються в середовищі з високими значеннями іонізуючого випромінювання.

Електронні та електричні системи є важливою складовою будь-якої робототехнічної системи. Деякі їхні компоненти, такі як електродвигуни, реле, соленоїди, порівняно мало схильні до негативних ефектів впливу іонізуючих випромінювань. У той

© Ю. О. Литвин, А. С. Садовніков, Р. В. Самоделок, О. С. Проскурін, 2020

же час елементи, що входять до системи управління (датчики зворотного зв'язку, процесори, підсилювачі, а особливо відеообладнання) в більшості випадків спроектовані із застосуванням напівпровідникових компонентів і досить чутливі до іонізуючого випромінювання.

Під час розробки цих систем використовуються основні відомі методи захисту електроніки і проводиться вивчення та тестування нестандартних рішень. Над деякими радіаційно стійкими роботизованими комплексами та їхніми окремими компонентами автори працюють спільно зі спеціалістами з КНР. Результатом співробітництва вже стало декілька технічних рішень, серед яких концептуальні моделі робота для радіаційної розвідки, робота для локалізації та транспортування радіоактивних відходів (РАВ), робота для сортування РАВ. Було розроблено радіаційно стійкий енергетичний трьохосьовий маніпулятор, проводились роботи над обладнанням для рідкосольового реактора (molten salt reactor), також розроблено та виготовлено експериментальний зразок пристрою для вилучення детекторів ПТА (Incore Instrument Thimble Assemblies) із зони реактора AP1000 компанії Westinghouse Electric. Проблема негативного впливу радіації на електроніку не дає можливості повністю автоматизувати деякі процеси, тому потребує подальшого вивчення і пошуку нових методів захисту. На всіх АЕС України вилучення детекторів із зони реактора також не обходиться без залучення особового складу, але актуальність радіаційно захищених систем виходить далеко за межі нашої держави. Так, наприклад, ліквідація наслідків аварії на АЕС «Фукусіма-1» проводиться із залученням радіаційно захищених роботів різних типів. При виготовленні космічної апаратури, військової техніки, медичної електроніки теж існує необхідність використання методів захисту від радіації.

Одним із необхідних етапів розробки систем, які входять до складу робототехнічних комплексів, що працюють в умовах високих значень іонізуючого випромінювання, має бути етап проведення тестування компонентів системи на предмет стійкості до дії радіації і визначення меж застосування розроблених систем в очікуваних умовах експлуатації.

Метою статті є проведення аналізу існуючих методів тестування, а також формування технічних та методичних підходів щодо тестування та захисту електронних компонентів при розробці робототехнічних пристроїв, що використовуються в умовах іонізуючого випромінювання.

Методи захисту електронних компонентів робототехнічних систем, методи та критерії їхнього тестування

Для робототехнічних систем, що працюють у середовищах із значним радіаційним забрудненням мають бути вжиті заходи щодо захисту їхніх компонентів від негативного впливу радіації. Основними методами, що дозволяють захистити електронні пристрої від негативного впливу іонізуючого випромінювання, є:

- захист дистанцією;
- захист екрануванням;
- використання радіаційно стійких електронних компонентів;
- розміщення компонентів з урахуванням імовірності та напрямків проходу частинок;
- резервування життєво важливих компонентів з рознесенням у просторі;
- використання схемотехнічних і програмних рішень для контролю за помилками, методи мажоритарного голосування під час прийняття рішення, використання контрольних сум і самокорегуючих кодів у пам'яті;

закладання додаткового запасу потужності компонентів для боротьби з радіаційною деградацією.

У процесі проектування радіаційно стійкого робототехнічного комплексу можна виділити такі необхідні етапи:

- 1) визначення та оцінка очікуваних умов експлуатації;
- 2) установлення технічних вимог до розроблюваної системи (у тому числі мінімальний час безперебійної роботи, позаштатні ситуації та інші параметри);
- 3) дослідження та порівняння наявних рішень;
- 4) вибір найбільш оптимальних варіантів конструкції і принципів роботи з урахуванням вищевикладених методів радіаційного захисту;
- 5) підбір або розробка системних компонентів, характеристики яких відповідають технічним вимогам і які здатні працювати в очікуваних умовах;
- 6) розробка і створення прототипів (модулів, підсистем і системи в цілому);
- 7) тестування прототипів у лабораторних і реальних умовах;
- 8) аналіз результатів тестування, порівняння з очікуваними результатами; прийняття поправок для наступної ітерації (починаючи з п. 5).

Ефективність перерахованих вище заходів повинна бути підтверджена експериментально.

У більшості випадків тестування радіаційної стійкості електронних компонентів і модулів проводиться за критеріями: загальна іонізуюча доза — total ionizing dose (TID), пошкодження при зміщенні — neutron displacement damage (NDD), перехідні ефекти випромінювання — transient radiation effects (TRE), ефект одиничної події — single event effect (SEE).

TID. Повна (накопичена) доза іонізуючого випромінювання є мірою енергії, що виділяється в одиниці маси матеріалу іонізуючим випромінюванням (в одиницях СИ: 1 Дж/кг = 1 Гр).

Як правило, вплив накопиченої дози тестують із застосуванням гамма-випромінювання з енергіями порядків від кеВ до МеВ. Досліджуються три основних типи взаємодії «фотон — речовина» (тип взаємодії залежить від енергії фотонів): фотоэффект, комптонівське розсіювання та утворення пар «електрон — позитрон».

Типовим методом TID-тестування є використання радіоактивного джерела кобальту-60. Кобальт-60 має дві гамма-серії: 1,17 і 1,33 МеВ. Використання джерел з кобальту-60 є економічно ефективним методом випробувань, дозиметрія відносно проста. Крім того, потужність дози можна контролювати, регулюючи відстань між джерелом, і перевіряти компонентом DUT. Для фотонів з більш низькою енергією також можуть бути використані рентгенівські трубки.

Інший метод, застосовуваний у TID-тестах, — використання прискорювачів електронів [2]. Ці прискорювачі є дорогими і складними, особливо якщо потрібні великі дози за низької потужності дози. Дозиметрія також складніша, ніж із радіоактивними джерелами. У зв'язку з низьким проникненням електронів метод не набув поширення (за винятком досліджень сонячних елементів). З іншого боку, випромінювання від джерел на основі прискорювачів можна точно контролювати, що робить роботу джерела більш гнучкою і безпечною.

SEE. Коли важкий іон з високою енергією проходить через середовище з достатньою швидкістю, він втрачає електрони і стає позитивно зарядженим (рис. 1) [3].

Проникаючи в матеріал кремнію, іон втрачає енергію на кулонівські взаємодії з електронами-мішенями, утворюється іонізаційний стовп. Ця втрата енергії на взаємодію зазвичай вважається відповідною лінійній передачі енергії (linear energy transfer, LET). Вона досягає максимуму на піку Бреґга (максимум графіка див. на рис. 1), де іон заповнює свої орбіталі електронами, захопленими від навко-

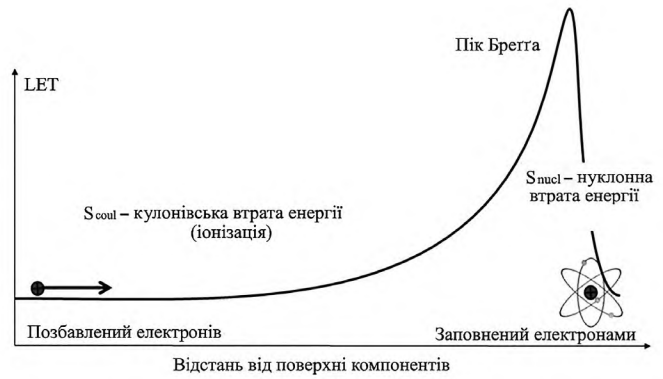


Рис. 1. Поведінка кривої Бреґга для іонізуючої частинки

лишніх атомів-мішеней. Ставши нейтральним атомом, він може наблизитися до ядер-мішеней і швидко сповільнитися за рахунок нуклонної взаємодії. Величина, що підпорядковується поведінці кривої Бреґга, називається енергією гальмування S. Гальмівна енергія — це сума енергій кулонівських і нуклонних взаємодій, тобто $S = S_{coul} + S_{nucl} = LET + NIEL$.

NIEL є аббревіатурою від неіонізуючої втрати енергії (non-ionising energy loss) і є причиною накопичення DDD (displacement damage dose — доза випромінювання, що призводить до пошкоджень зміщенням) у кристалічних матеріалах, таких як кремній.

У SEE-методі випробувань розріз, на якому поширюються пошкодження, визначається як функція LET (рис. 2). Шляхом збільшення LET і контролю поперечного перерізу зразка можна отримати порогові і насичені рівні виникнення помилок. Щоб порівняти радіаційні відгуки для різних компонентів, переріз

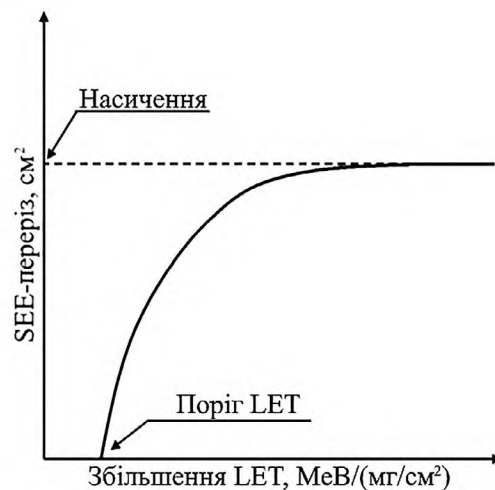


Рис. 2. Принцип дослідження впливу SEE: крива відгуку на зміну LET

повинен бути унормований на загальну щільність частинок на 1 см^2 . Значення LET варіюються вибором іонів з різними масами так, щоб рівномірно розподілити їх на всю досліджувану область, захоплюючи порогову область і область насичення.

У лабораторних дослідженнях джерела випромінювання штучних частинок, такі як ^{226}Ra (100% α -випромінювач) і ^{252}Cf (3% самовільного розподілу з важкими осколками, із середнім LET $43 \text{ MeV}/(\text{мг}/\text{см}^2)$ і $T_{1/2} = 2,65$ року) зручні для дослідження радіаційної стійкості електронних компонентів через їхню низьку ціну і простоту використання. Їхніми недоліками є обмежена енергія та види іонів, а також обмежена інтенсивність. Через ці обмеження використання таких джерел радіоізоотопів для SEE-випробувань заборонено в офіційних випробуваннях забезпечення радіаційної стійкості (RHA — radiation hardness assurance). Ці джерела зазвичай використовуються тільки для пробних запусків установки RHA-тестування. Сьогодні для SEE-тестів використовуються лазери, однак специфікації RHA вимагають використання прискорювачів частинок або реакторів.

Метою тестування є виявлення впливу потоків протонів і важких іонів на цілісність структурних елементів напівпровідникових пристроїв (елементів пам'яті, транзисторів тощо).

NDD. Пошкодження при зміщенні є результатом ядерної взаємодії, зазвичай розсіювання, яке спричиняє дефекти решітки (рис. 3). Збиток від зсуву зменшує термін життя вторинних носіїв заряду; типовим ефектом буде погіршення коефіцієнта посилення і виток струму в біполярних транзисторах.

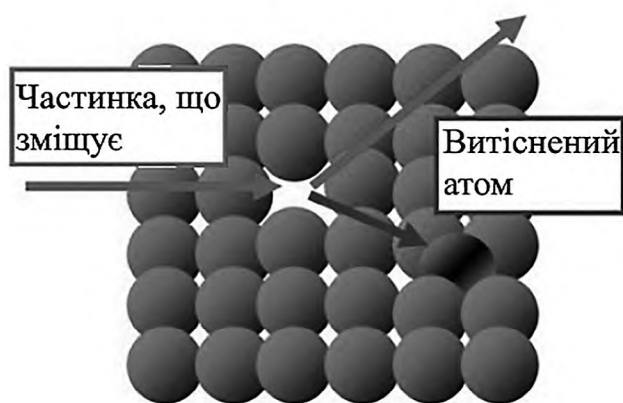


Рис. 3. Утворення пошкодження зміщенням

Під час тестування проводиться замірювання дрейфу параметрів напівпровідникових елементів

під впливом потоків нейтронів різних енергій. Типові енергії, що використовуються для цього тесту: 50–60 MeV, 10 MeV, 1–3 MeV.

TRE. Дослідження перехідних постефектів впливу іонізуючих частинок є одним з підвидів SEE-тестів, тому що такі процеси відбуваються поодинокі, однак можуть призводити до перманентних руйнувань працюючого елемента. До TRE-тестування входять дослідження можливих негативних наслідків впливу високоенергетичних частинок на структуру, властивості та функціонування електронних напівпровідникових компонентів:

SEU — single event upset (спонтанне перемикання логічного стану одиниці пам'яті);

SET — single event transient (одноразовий сплеск напруги);

SEL — single event latch-up і SESB — single event snap back (короткочасне коротке замикання внаслідок утворення «наскрізного» токопровідного каналу);

SEB — single event burn-out (повне вигорання структурних складових транзистора внаслідок надмірного збільшення струму, що через нього протікає);

SEGR — single event gate rupture (формування струмопровідних областей в оксиді підзатворної області польових транзисторів);

SEFI — single event functional interrupt (функціональні порушення роботи мікросхеми або модуля, спричинені однією з вищеописаних подій, що усуваються перезанпуском мікросхеми/модуля).

Для будь-якого робототехнічного пристрою доцільно проводити трирівневе тестування радіаційної стійкості: тестування окремих компонентів, мікросхем; юніт-тестування — плати або модулі в зборі; тестування всього пристрою.

Тестування окремих компонентів. Первинне тестування компонентів найчастіше проводиться з ініціативи фірми-виробника компонента з видачею їй відповідного сертифіката. Наприклад, більшість продукції фірми Microsemi, призначеної для використання у військовому обладнанні й устаткуванні для космосу і спецсистем, проходить тести за методами MIL-STD-883E TM 1019 (TID) і TM 1020 1021, 1023 (SEE) [6]. У наш час випускаються дві лінійки електронних компонентів (у тому числі й FPGA) з різними підтвердженими рівнями радіаційної стійкості: Radiation tolerant ($TID < 300 \cdot 10^3$ рад) і Radiation hardened ($TID \geq 300 \cdot 10^3$ рад). Окремо наводяться характеристики за результатами SEE-тестів. Ще одним виробником радіаційно стійких компонентів є Actel. І Microsemi, і Actel використовують у своїх чіпах мо-

дифіковані топології і схемотехнічні рішення для підвищення стійкості до радіації.

Обов'язкове тестування і сертифікацію повинні мати всі напівпровідникові компоненти, що застосовуються. У складі робототехнічної системи до них належать компоненти, що входять до складу підсистем ручного та автоматичного керування, сервоприводів, джерел живлення: процесори (мікроконтролери або FPGA), напівпровідникові датчики зворотного зв'язку, мікросхеми пам'яті, операційних підсилювачів, буферів і дискретні компоненти, такі як транзистори, діоди та ін. Деякі компоненти принципово не вимагають окремого тестування: реле, трансформатори, більшість електромоторів, резистивні та індуктивні датчики зворотного зв'язку, сельсини. Вони не мають у своїй конструкції елементів, що піддаються негативному впливу радіації.

Юніт-тестування. Юніт-тести призначені для оцінки загального рівня стійкості модулів у зборі до впливу радіації. Стійкість модуля може бути як нижче (унаслідок різниці характеристик різних застосованих компонентів), так і вище (переміщення модуля в екранований корпус, внутрішня взаємна корекція помилок або резервування на рівні блоків), ніж в окремих складових його компонентів.

Тестування модулів проводиться в лабораторних умовах за тими ж методиками, що й для окремих компонентів. Відмінність полягає лише в методиці SEE-тестів: у більшості випадків спостерігається загальний функціональний стан і ймовірності помилок за різних рівнів енергії частинок, визначається поріг енергії, за якої потрапляння частинки призводить до незворотних змін (SEL, наступний SEB). Можливий контроль стану структури компонентів після тестування на певному рівні енергії частинок з метою оцінки NDD.

Юніт-тести обов'язкові для обчислювальних модулів, систем автоматичного керування (САК), відеокамер і їхньої об'єкти, модулів живлення, пристроїв бездротового прийому та передавання інформації. Якщо силові модулі комутації приводів виконані на основі напівпровідникових ключів (MOSFET або IGBT), то для них так само необхідне проведення тестів, особливо TID.

Комплексне тестування. Комплексне тестування пристрою (робота, робототехнічної системи) може бути проведено в лабораторних умовах, але найчастіше доцільно проводити випробування в реальних робочих умовах. Останнє дозволяє виявити стійкість обладнання до одночасного впливу різних типів радіаційного впливу. При цьому контролюється-

ся загальний стан системи, відслідковуються відмови, їхня природа і залежність від стану середовища (енергія і типи частинок або випромінювання). Такого роду тестування може бути в деяких випадках ускладнено, тому що тестована система повинна бути забезпечена дозиметричним і контролюючим обладнанням.

Комплексне тестування і дослідження наслідків впливу середовища може бути застосовано до всіх складових робототехнічної системи: ходової частини, маніпулятора, навісного устаткування, САК, обладнання віддаленого управління, джерел живлення тощо. Воно здатне виявити вплив взаємного розташування модулів у просторі, ступінь ефективності резервування модулів та інші аспекти, які складно оцінити тестуванням окремих модулів.

Висновки

Для вирішення проблеми радіаційної стійкості обладнання в першу чергу мають бути вжиті заходи щодо захисту його компонентів із впровадженням основних методів. У процес проектування мають бути включені описані в статті етапи, результати яких будуть безпосередньо впливати на стійкість до іонізуючого випромінювання, а ефективність перерахованих вище заходів повинна бути підтверджена експериментально.

Результати проведеного аналізу свідчать, що існуючі методики тестування електронних компонентів за критеріями TID, SEE, NDD, TRE можуть бути застосовані для визначення рівнів радіаційної стійкості пристроїв у складі робототехнічних комплексів, які працюють у важких умовах іонізуючого випромінювання.

Доцільним є поетапне тестування окремих компонентів, модулів і систем у цілому для визначення граничних доз і кількості одиничних ефектів, що призводять до порушення нормальної роботи комплексу.

Описані методи можуть бути впроваджені як у галузі атомної енергетики, так і в інших галузях, де є необхідність проведення робіт у середовищі з високими значеннями іонізуючого випромінювання (оборонна галузь, космічна, медицина та ін.). Ці методи можуть і мають використовуватись під час розробки радіаційно стійкого обладнання, роботів, роботизованих та автоматизованих комплексів і систем, окремих вузлів і деталей. Вони будуть впроваджуватись під час подальших робіт із перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему та під час робіт з розробки обладнання для АЕС (у тому числі АЕС Хайян, КНР), що виконуються спеціалістами ІПБ АЕС НАН України спільно зі спеціалістами з КНР.

Список використаної літератури

1. Radiation Testing / Northrop Grumman Systems Corporation. — 15-0956 AS BP 05/2015 66943.
2. Total Dose Steady-State Irradiation Test Method. 1. ed. ESA/SCC Basic Specification No. 22900 / European Space Agency. — 2010. — 17 p.
3. Virtanen A. Facilities and Radiation Test Methods / A. Virtanen // Proceedings of 10th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications; JAXA special publication. — 2013. — P. 90–95. — JAXA-SP-12-008E. — Available at: <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/bitstream/a-is/19017/1/61889019.pdf>.
4. Об'єкт «Укриття»: 30 років після аварії / В. О. Краснов, А. В. Носовський, В. М. Рудько, В. М. Щербін. — Чорнобиль : ІПБ АЕС НАН України, 2016. — С. 184–196.
5. Садовніков А. С. Використання робототехніки при ліквідації наслідків аварій на АЕС / А. С. Садовніков // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2014. — Вип. 22. — С. 23–33.
6. MIL-STD-883E. Test method standard microcircuits / Department of Defense. USA. — 1996. — 641 p. — Available at: <http://scipp.ucsc.edu/groups/fermi/electronics/mil-std-883.pdf>.

Ю. А. Литвин, А. С. Садовніков, Р. В. Самоделок, А. С. Проскурін

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина

Методы тестирования радиационной стойкости компонентов робототехнических комплексов

Рассмотрены методики тестирования радиационной стойкости электронных модулей и отдельных компонентов, в том числе и полупроводниковых, применяемых в составе систем робототехнических комплексов. Проведен обзор типовых методик тестирования электронных компонентов под воздействием γ -излучения и нейтронного потока, определены стандарты, которые могут быть применены. Описано тестирование радиационной стойкости электронных компонентов и модулей, которое проводится по таким параметрам, как total ionizing dose (TID), neutron displacement damage (NDD), transient radiation effects (TRE) и single event effects (SEE). Приведены основные методы, позволяющие защитить электронные

устройства от негативного влияния ионизирующего излучения, и меры, которые необходимо учитывать в процессе проектирования радиационно стойкого робототехнического комплекса. Сформирована последовательность выполнения тестов при разработке робототехнической системы. Определена целесообразность поэтапного тестирования отдельных компонентов, модулей и систем в целом для определения предельных доз и количества единичных эффектов, приводящих к нарушению нормальной работы комплекса.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, радиационная стойкость, тестирование, атомная энергетика.

Y. O. Lytvyn, A. S. Sadovnikov, R. V. Samodielok, O. S. Proskurin

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 12, Lysogirska st., Kyiv, 03028, Ukraine

Test methods for radiation resistance of components of robotic complexes

One of the urgent problems of using robotic complexes at nuclear power facilities is related to the problem of the negative impact of radiation on system components and the functioning of complexes as a whole. An important component of any robotic system are electronic and electrical systems. Some of their components, such as electric motors, relays, solenoids, are relatively little susceptible to negative radiation effects. At the same time, the elements included in the control system in most cases are designed using semiconductor components, they are also quite sensitive to radiation. Methods of testing the radiation resistance of electronic modules and components including semiconductor ones used as part of robotic systems were considered in the article. A review of typical methods for testing electronic components under the influence of γ -radiation and neutron flux was conducted, and applicable standards were determined. The sequence of tests during the development of a robotic system was formed. In the article particular attention is paid to the following issues:

the main methods to protect electronic devices from the negative effects of ionizing radiation;

stages to be taken into account in the process of designing a radiation-resistant robotic complex;

radiation resistance testing of electronic components and modules produced by such parameters as: Total Ionizing Dose (TID), Neutron Displacement Damage (NDD), Transient Radiation Effects (TRE) and Single Event Effects (SEE);

description of testing structural elements of a robotic system (testing individual components and microchips, unit-testing of a boards and modules assembly, testing the entire device).

The expediency for step-by-step testing of individual components, modules and systems as a whole to determine limit doses and the number of single effects that lead to disruption of the normal operation of the complex is described and explained in the article.

Keywords: robotic complex, radiation resistance, testing, nuclear energy.

References

1. Northrop Grumman Systems Corporation. *Radiation Testing*, 15-0956 AS BP 05/2015 66943.
2. European Space Agency (2010). *Total Dose Steady-State Irradiation Test Method*. 1. ed. ESA/SCC Basic Specification No. 22900, 17 p.
3. Virtanen A. (2013). Facilities and Radiation Test Methods. Proceedings of *10th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications*. JAXA special publication, pp. 90-95, JAXA-SP-12-008E. Available at: <https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/bitstream/a-is/19017/1/61889019.pdf>.
4. Krasnov V. O., Nosovskyi A. V., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2016). *Obiekt «Ukryttia»: 30 rokiv pislia avarii* [Shelter object: 30 years after the accident]. Chornobyl: Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 512 p. (in Ukr.)
5. Sadovnikov A. S. (2014). [Use of robotics in eliminating the consequences of accidents at NPPs]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostansiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 22, pp. 23–33.
6. Department of Defense, USA (1996). *MIL-STD-883E. Test method standard microcircuits*, 641 p. Available at: <http://scipp.ucsc.edu/groups/fermi/electronics/mil-std-883.pdf>.

Надійшла 30.01.2019

Received 30.01.2019