

ОГЛЯД РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ КОМПОНЕНТІВ ЗАГАЛЬНОПРОМИСЛОВОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

О. В. Чермалих, Д. Д. Мугенов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
вул. Борщагівська, 115/3, корп. 22, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: danila8902@gmail.com

Проведено огляд складу частотно-регульованого електроприводу підйому мостового крану, який встановлено в приповерхневому сховищі для складування радіоактивних відходів. Виявлено матеріали електроприводу, радіаційна зміна параметрів яких суттєво позначиться на працездатності всієї системи. Оскільки сховище радіоактивних відходів знаходиться в Чорнобильській зоні відчуження, мостовий кран піддається впливу радіаційного іонізуючого випромінювання, яке викликано загальною активністю відходів і підвищеним фоном місцевості. Достовірно відомо, що в системі електроприводу об'єкта застосовується обладнання загальнопромислового виконання, тобто не вживаються жодні заходи і спеціальні технології для радіаційного захисту обладнання. В результаті досліджень встановлено, що найчутливішими до радіації елементами електроприводу є напівпровідникові пристрої. Оскільки високі динамічні характеристики сучасних електроприводів забезпечуються застосуванням силових напівпровідникових ключів, зміна їх параметрів із ростом поглиненої дози іонізуючого випромінювання невідворотно призведе до зміни роботи всієї системи. Важливість отриманих результатів полягає у можливості оцінки характеру впливу радіації на робочі характеристики електроприводу і подальшої розробки засобів його компенсації.

Ключові слова: електропривод, компоненти, напівпровідники, працездатність, радіація, стійкість.

ОБЗОР РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОМПОНЕНТОВ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А. В. Чермалых, Д. Д. Мугенов

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
ул. Борщаговская, 115/3, корп. 22, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: danila8902@gmail.com

Проведен обзор состава частотно-регулируемого электропривода подъема мостового крана, установленного в приповерхностном хранилище для складирования радиоактивных отходов. Выделены материалы электропривода, радиационное изменение параметров которых существенно скажется на работоспособности всей системы. Поскольку хранилище радиоактивных отходов находится в Чернобыльской зоне отчуждения, мостовой кран подвергается воздействию радиационного ионизирующего излучения, которое вызвано общей активностью отходов и повышенным фоном местности. Достоверно известно, что в системе электропривода объекта применяется оборудование общепромышленного исполнения, то есть не принимаются никакие меры и специальные технологии для радиационной защиты оборудования. В результате исследований установлено, что наиболее чувствительными к радиации элементами электропривода являются полупроводниковые устройства. Поскольку высокие динамические характеристики современных электроприводов обеспечиваются применением силовых полупроводниковых ключей, изменение их параметров с ростом поглощенной дозы ионизирующего излучения неизбежно приведет к изменению работы всей системы. Важность полученных результатов заключается в возможности оценки характера влияния радиации на рабочие характеристики электропривода и последующей разработки средств его компенсации.

Ключевые слова: электропривод, компоненты, полупроводники, работоспособность, радиация, стойкость.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Для захоронення ядерних відходів у Чорнобильській зоні відчуження споруджені промислові комплекси для прийому, переробки та захоронення радіоактивних відходів (РАВ). До їх числа відносяться завод з переробки рідких відходів і промисловий комплекс з поводження з твердими радіоактивними відходами. Продуктами цих установ є 200 літрові бочки з отверділим в цементній матриці рідкими РАВ і залиті бетоном бетонні контейнери з твердими РАВ. Вага таких контейнерів може досягати декількох десятків тонн і для їх складування необхідно використовувати підйомно-транспортне обладнання. Спеціально обладнане приповерхнє сховище складається з двох паралельних секцій модулів, виконаних з монолітного залізобетону. Довжина модуля – 24, ширина – 18 і висота – 7 м; товщина стін – 0,4 м. Кожна секція, яка складається з одинадцяти модулів коробчастого типу, оснащується

мобільною будівлею з мостовим краном для роботи з упаковками [1]. Механізми мостового крана приводяться в рух засобами електричних приводів за схемою перетворювач частоти (ПЧ) з ланкою постійного струму - асинхронний короткозамкнений двигун (АДКЗР). Оскільки кран знаходиться в агресивному середовищі радіаційного випромінювання, викликаного загальною активністю РАВ і підвищеним радіаційним фоном місцевості, доречно оцінити ступінь впливу радіації на робочі характеристики його електроприводів (ЕП). Так як усі електроприводи виконані за однаковою схемою ПЧ-АДКЗР, далі буде розглядатися лише електропривод підйому.

Мета роботи – розглянути функціонал, конструкцію і складові матеріали елементів частотно-регульованого електроприводу підйому мостового крану. Проаналізувати вплив іонізуючого випромінювання (ІВ) на матеріали, з яких виготовлено еле-

ктропривод. Виявити матеріали, зміна параметрів яких під впливом радіації істотно позначається на роботі системи електроприводу.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для того, щоб оцінити дію ІВ на матеріали, з яких складається система електропривода, розглянемо

детально його структуру. Оскільки нас цікавить вплив ІВ на вихідні характеристики електроприводу, дослідимо функціональну схему електропривода. Використовуючи загальну функціональну схему [2], побудовано схему для окремого випадку приводу підйому мостового крану (рис. 1).

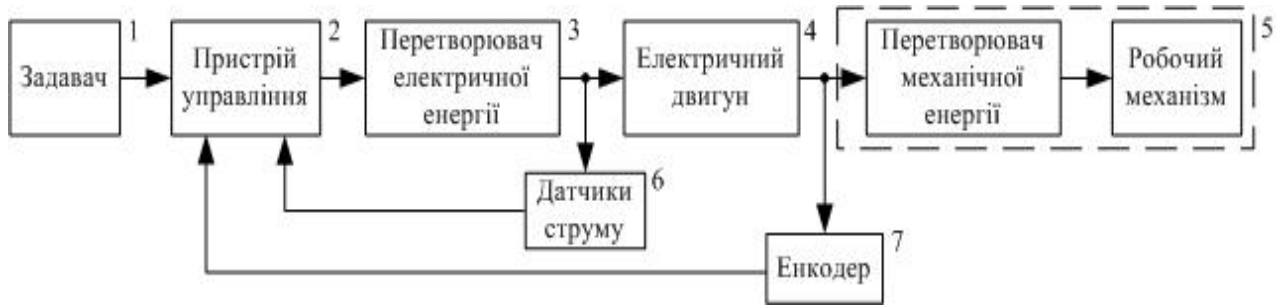


Рисунок 1 – Функціональна схема електропривода підйому мостового крану

На рис. 1: Задавач – джойстик (командоконтролер) оператора; Пристрій управління – програмований логічний контролер (ПЛК); Перетворювач електричної енергії – ПЧ; Електричний двигун – АДКЗР; Перетворювач механічної енергії – редуктор; Робочий механізм – таль; Датчик струму у внутрішній структурі ПЧ; Енкодер – датчик швидкості.

1. Огляд конструкції і матеріалів, з яких складається кожен з елементів електроприводу

1.1. Комплект станції віддаленого управління мостовим краном окрім іншого включає в себе стаціонарний пульт управління краном у вигляді стола, оснащеного засобами управління краном. В консолях управління в якості задавача застосовуються командоконтролери (джойстики): двовісний, для пересування моста і візка, і одновісний, для підйому і спуску вантажу.

Основними конструктивними елементами командоконтролера є корпус, руків'я і блок контактів. Корпус виконується із конструкційної сталі, руків'я – із пластику, для зручності утримання в широкому діапазоні температур.

Вимоги до блоку контактів досить широкі. Крім типових контактних властивостей, таких як:

- висока стійкість до дугової ерозії;
- висока стійкість до зварювання;
- низький опір контакту;
- здатність до гасіння дуги; вони мають проявляти фізичні, механічні та хімічні властивості, такі як

висока електрична та теплопровідність, висока твердість, висока стійкість до корозії тощо.

Матеріали, придатні для використання в якості електричних контактів, можна розділити на наступні групи за своїм складом та металургійною структурою:

- метали: найчастіше для комутаційних приладів застосовується срібло, а інші дорогі метали, такі як золото та платина, використовуються лише для інформаційних технологій у вигляді тонких поверхневих шарів;
- сплави: дозволяють поліпшити властивості матеріалу за рахунок легування;
- композитні матеріали, використовуються для комутації великих струмів.

Провідники виконуються із мідних дротів.

Основними матеріалами, з яких складається командоконтролер є конструкційна сталь, пластик, мідь і срібло.

1.2. Пристроєм управління є програмований логічний контролер. ПЛК – це уніфікована цифрова керуюча електронна система, спеціально розроблена для використання у виробничих умовах. Він реалізує функції управління, захисту від перевантажень механізмів, реєстрації робочих параметрів крана, діагностики і параметрів обслуговування. Поверхнево склад ПЛК показано на рис. 2.



Рисунок 2 – Функціональна схема ПЛК

Спрощено можна представити склад ПЛК у вигляді трьох секцій: вхідної, центральної і вихідної. Вхідна секція виконує функцію збору інформації, через вихідну ПЛК здійснює управління зовнішніми виконавчими пристроями. Входи і виходи ПЛК поділяють на дискретні і аналогові. Для функціонування дискретних виходів ПЛК використовуються керувані контакти, вимоги до них аналогічні п. 1. Пасивні електротехнічні елементи (резистори, котушки індуктивності і конденсатори) застосовуються для забезпечення функціонування аналогових входів і виходів.

В центральній секції відбувається обробка інформації і вона складається із центрального процесора (ЦП), пам'яті і системи комунікацій. В якості ЦП використовуються стандартні 8- або 16-розрядні мікропроцесори, в залежності від складності обчислювальних задач. Пам'ять складається з: постійного запам'ятовуючого пристрою (ROM – Read Only Memory) і оперативного запам'ятовуючого пристрою (SRAM – Static Random Access Memory). Вищезазначені елементи є напівпровідниковими пристроями із складною топологією. Напівпровідникові пристрої виконують на основі кремнію або германію. На сьогоднішній день широкого застосування в якості напівпровідника донорного *n*-типу набув кремній із домішкою арсену, а в якості акцепторного *p*-типу – кремній із домішкою галію.

Система комунікації ПЛК побудована на основі друкованих плат, які виконані із діелектрика (склотекстоліт) на якому сформовано шар із мідного провідника. В якості провідного матеріалу за межами плат застосовуються дроти з мідними жилками.

Таким чином, конструктивно ПЛК складається із наступних матеріалів: мідь, алюміній, кремній, склотекстоліт. А також із пасивних елементів – резисторів, індуктивностей і конденсаторів.

1.3. Перетворювач частоти представляє собою класичний перетворювач із ланкою постійного струму. Сучасні перетворювачі мають в своєму складі інформаційний і силовий канали. Інформаційний канал складається з мікропроцесора і допоміжних схем, він забезпечує управління силовими ключами автономного інвертора напруги (АІН), а також вирішення побічних завдань – контроль, діагностика, захист і т.п.. Силовий канал складається із некеруваного мостового випрямляча, фільтра, АІН і драйверів управління силовими ключами. Слід зазначити, що ПЧ є складним електротехнічним пристроєм і, як і ПЛК, має в своєму складі клеми, друковані плати, пасивні елементи електронної техніки, логічні напівпровідникові мікросхеми складної топології і силові напівпровідникові пристрої (діоди і транзистори). Тому, основними складовими матеріалами перетворювача частоти є: мідь, алюміній, склотекстоліт і кремній.

1.4. Асинхронний електричний двигун з короткозамкненим ротором складається із нерухомого статора і ротора, що обертається. Статор встановлюється в алюмінієвий або чавунний корпус і складається із мідних обмоток і сталевих магніто-

проводу. Витки обмотки статора відокремлені одна від одної шаром ізоляції. Для цього використовують лакотканини і склотканини, що представляють собою тканини на основі бавовняних, шовкових, капронових і скляних волокон, просочених лаком. Просочення підвищує механічну міцність і покращує ізоляційні властивості лакотканин. Магнітопровід виконано із шихтованої електротехнічної сталі. Ротор збирається із короткозамкнених провідників типу біляча клітина і магнітопроводу. Вал ротора спирається на сталеві підшипники оброблені мастильним матеріалом.

Отже, основними складовими матеріалами АДКЗР є чавун, алюміній, мідь, лако- або склотканини, шихтована електротехнічна сталь, конструкційна сталь, мастильні матеріали

1.5. Для уникнення плутанини в термінах і спрощення огляду об'єднаємо перетворювач механічної енергії і робочий механізм в єдину механічну частину електроприводу. До її складу входять: пружна муфта, циліндричний редуктор, барабан, трос і гак.

Муфта пружна втулково-пальцева складається із двох сталевих напівмуфт з'єднаних болтами, в одній з напівмуфт між болтом і отвором вкладені гумові втулки.

Механічний редуктор збирається із герметичного корпусу, тихохідного і швидкохідного валів, секції передачі механічного зусилля в вигляді системи шестерень. Корпус виготовляється із литого чавуна, рідше – із ливарної сталі. В середині корпусу розташовано систему шестерень, занурену в мастильний матеріал. Шестерні виготовляють із конструкційної сталі.

Підйомні барабани сконструйовано таким чином, щоб навантаження розподілялося в рівних пропорціях на балки моста. Барабани виготовлені із литої сталі і листового прокату.

Підйомні троси спеціально призначені для роботи на кранах, гнучкі, високого ступеня міцності виготовляються із сталі.

Ковані гаки виготовляють, в основному, зі сталі 20 або зі сталі 20Г.

Підсумовуючи вищесказане, основними матеріалами в складі механічної частини електроприводу є: конструкційна сталь, гума, чавун, мастильні матеріали.

1.6. Для створення замкненої системи управління і забезпечення принципу зворотного зв'язку, у внутрішній структурі ПЧ застосовуються датчики струму на ефекті Холла. Такі датчики реалізовано у напівпровідникових мікросхемах, розташованих в немагнітних зазорах сердечника, який кільцем охоплює провідник, струм у якому вимірюється. Таким чином, складовими частинами датчика струму є магнітопровід і напівпровідникова мікросхема. Магнітопровід виконують із шихтованої електротехнічної сталі, мікросхеми – із кремнію.

1.7. Використання енкодера дозволяє здійснювати дрібні рухи і мінімальні зміни положення як при роботі крана з пульта дистанційного керування, так і при його роботі з підвісним пультом. За

принципом дії енкодери розрізняють на оптичні, магнітні і магніторезистивні.

Оптичні енкодери конструктивно складаються із оптопар, між джерелом світла і фотоприймачем якої обертається закріпленій на валу диск із прозорими і непрозорими ділянками. Випромінювач оптрона виготовляється на основі арсеніду галію, фотодіод – на основі кремнію.

Магнітний енкодер включає в себе вал з магнітом і датчик Холла, який реєструє проходження магнітних полюсів. Найпоширенішими є феритові, а також рідкоземельні – неодимові постійні магніти. Феритові магніти виготовляють із сплаву оксиду заліза з феритом барію або стронцію. Датчик Холла розглянуто в п. 1.6.

Магніторезистивний енкодер складається з закріпленої на валу котушки індуктивності, яка вміщена в магнітне поле. Під час обертання валу змінюється положення витків котушки відносно поля, що викликає зміну величини струму, який протікає через котушку в залежності від кута повороту вала. Котушка виконана із мідного провідника, витки ізольовані один від одного. Магнітне поле створюється постійними феритовими магнітами.

Отже, в залежності від конструкції, складовими матеріалами енкодера є арсенід галію, кремній, сплав оксиду заліза з феритом барію або стронцію, неодим, електротехнічна сталь, мідь, ізоляція.

Нас цікавить вплив ІВ на працездатність електроприводу, тому доцільно розглядати радіаційні зміни параметрів складових матеріалів з точки зору виконання ними їх основної функції в даній конкретній системі. Поділимо складові матеріали ЕП на категорії за функціоналом:

- механічні (конструкційна сталь, пластик, чавун, алюміній, мастильні матеріали, гума);
- електротехнічні:
- провідники (мідь, срібло, алюміній, латунь);
- напівпровідники (кремній, арсенід галію);
- діелектрики (склотекстоліт, лакотканини, склотканини, полівінілхлорид, поліетилен, фторопласт, полістирол, папір);
- магнітні (неодим, сплав оксиду заліза з феритом барію або стронцію, електротехнічна сталь).

Окремо можна розглядати вплив ІВ на параметри пасивних елементів електричних кіл: резисторів, конденсаторів і котушок індуктивностей.

2. *Види радіаційного випромінювання приповерхневих сховищ радіоактивних відходів і вибір об'єктові радіаційної величини.*

Згідно досліджень [3, 4] сховища радіоактивних відходів є джерелами нейтронного і гамма випромінювання. Це пояснюється природою видів ІВ. Корпускулярні альфа і бета випромінювання мають низьку проникаючу здатність і малий пробіг – декілька сантиметрів і метрів відповідно. Від такого випромінювання повністю захищає металевий шар бочки рідких РАВ і бетонний контейнер твердих РАВ. Найбільшу проникаючу здатність мають електромагнітні гамма випромінювання: висока частота електромагнітних хвиль сприяє відносно глибокому їх проникненню в міжатомне середовище і малому поглиненню речовиною [5]. У зв'язку із від-

сутністю заряду і слабкою взаємодією з речовиною проникаюча здатність нейтронів також досить велика і порівнянна до гамма випромінювання [6].

Відповідно до [7] найбільш істотний вплив на властивості матеріалів за рахунок зміщення атомів в кристалічній решітці, ядерних реакцій, розривів хімічних зв'язків та ін. справляють нейтронне і гамма випромінювання. Пошкодження, які викликає опромінювання, залежать від вихідної структури матеріалу і умов, за яких відбувається опромінювання. До таких умов відносять:

1. тип, енергія і спектр частинок, що іонізують речовину;
2. щільність потоку частинок або потужність дози опромінювання;
3. тривалість опромінювання (доза, флюенс або інтегральний потік);
4. температура;
5. інші зовнішні впливи.

Розглянемо кожен із пунктів окремо.

1. В залежності від енергії нейтрони поділяють на такі типи: повільні, або теплові (із середньою енергією $\sim 0,025$ eВ); резонансні (з енергією до 0,5 кеВ); проміжні (з енергією від 0,5 кеВ до 0,5 МеВ); швидкі (з енергією від 0,5 до 20 МеВ); надшвидкі (з енергією понад 20 МеВ) [6]. Енергія ядерного гамма-випромінювання лежить в інтервалі від 10 кеВ до декількох МеВ і спектр цього випромінювання лінійчатий, тобто складається з ряду дискретних ліній. Отже, енергія іонізуючих частинок коливається в широкому діапазоні від 0,025 eВ до 20 МеВ і завбачити її наперед не представляється можливим.

2. Щільність потоку іонізуючого випромінювання ϕ – це кількість іонізуючих частинок (в даному випадку нейтронів або гамма-квантів) ядерного випромінювання, що перетинають за 1 с площу 1 см^2 , яка розташована нормально до потоку ІВ ($\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$) [8]. Зрозуміло, що щільність цілком залежить від джерела випромінювання. Джерелом являються РАВ і підвищений радіаційний фон місцевості. Оскільки тривалість завантаження сховища, а відповідно і робота електроприводу крану, вимірюється роками, передбачити на такий строк щільність потоку РАВ неспромога. Таке положення пов'язане із різноманітністю матеріалів РАВ і їх радіоактивністю. Поведінку фону передбачити майже неможливо, це пов'язано із природними (напрямок вітру) і техногенними факторами (в зоні із підвищеною концентрацією радіоактивних речовин зростає імовірність позаштатних ситуацій).

3. Помноживши щільність на час під опромінюванням отримаємо флюенс, або інтегральний потік. Оскільки завантаження сховища відбувається не рівномірно у часі, тобто завантажені блоки з РАВ простоюють у відкритому сховищі, накопичення поглиненої дози обладнанням відбувається також нелінійно. Іншими словами – поглинена доза не є функцією лише від часу, а залежить від типу, активності, кількості РАВ і часу опромінювання.

4. Температура матеріалу, який піддається опромінюванню. Під час заповнювання, сховище

обладнано металевим дахом і стінами. Таке облаштування захищає від опадів, але на температуру не впливає. Як і в пункті 2, температура є природним фактором.

Очевидно, що врахувати вищезазначені умови у повному обсязі практично неможливо, навіть не беручи до уваги пункт 5, хоча проводяться дослідження по прогнозуванню і оцінці радіаційних ризиків за допомогою мобільних лабораторних комплексів [23]. Тому в експериментальних і теоретичних дослідженнях для кількісної оцінки впливу радіації на матеріали, прилади і пристрої найчастіше використовують лише одну величину, що характеризує вплив ІВ – поглинену дозу або інтегральний потік. Для уніфікації існує формула перекладу інтегрального потоку ($см^{-2}$) в поглинену дозу ($рад$) [9]:

$$\Phi[рад] \approx 2,17 \cdot 10^9 \cdot (hv)^{-1} [см^{-2}], \quad (1)$$

де hv – енергія кванта в МеВ, вираз справедливий для області енергій $2 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^6$ еВ, похибка $\pm 15\%$.

3. Огляд впливу іонізуючого випромінювання на елементи і матеріали, з яких складається електропривод, та їх дозової стійкості

3.1. Дія радіації на матеріали ЕП, що виконують механічні функції

До основних явищ, що визначають працездатність конструкційних матеріалів відносять: високу і низькотемпературне охрупчення; радіаційні повзучість, хладноломкість і розпухання; термічна втома; зниження опору до корозійного руйнування; утворення тріщин в областях втоми матеріалу. В роботі [10] показано, що зміна загального подовження сталі відбувається при флюенсі більше 10^{20} $1/см^2$ і температурі від 85 до 750°C. Залежність пластичності сталі також спостерігаються при надвисоких флюенсах і температурах більше 200°C. Радіаційне розпухання сталі відбувається при дозах порядку 10^{23} $1/см^2$ і температурі вище 450°C.

Для полімерів характерна наявність великої кількості зв'язків, розрив яких під дією іонізуючих випромінювань при досить тривалому опроміненні повністю перетворює речовину. Зміна властивостей полімерів при дії на них випромінювання високої енергії обумовлена радіаційно-хімічними перетвореннями зв'язків між молекулами, що може призвести до деструкції макромолекул з утворенням летючих продуктів і макромолекул меншої довжини, аж до перетворення полімерів в в'язку рідини. Помітні зміни механічної міцності пластмас наступають при поглинених дозах опромінення $10^7 - 10^8$ рад: настає механічна деформація і підвищується крихкість. [11]

Чавунним виконуються корпуси електричних машин. Чавунні екрани використовуються для захисту від гамма-випромінювання, оскільки чавун має велику густину, 7200 $кг/м^3$. Виразних досліджень

механічної стійкості чавуна від радіації не виявлено. Оскільки чавун є сплавом заліза з вуглецем (понад 2% вмісту вуглецю, на відміну від сталі), справедливим буде припущення подібності радіаційної стійкості чавуна і конструктивних сталей.

Згідно дослідження [12] виявлено, що опромінення мастильних матеріалів на мінеральній основі різними дозами гамма-випромінювання не надає істотного впливу на його в'язкість. Величина дози, під впливом якої максимально змінюються експлуатаційні властивості мастила, дорівнює 2 крад. Під впливом такої дози опромінення електропровідність масла підвищується на 11%, поверхневий натяг знижується на 11,5%, протизадирні і антифрикційні властивості підвищуються на 13%, а протизносні - на 35%. Фізико-хімічні показники, такі як в'язкість, луже число, під впливом гамма-випромінювання практично не змінюються.

Дослідження [13] демонструють, що зміна механічних властивостей гум починається із величини поглиненої дози 7,7 Мрад. Крива діаграми деформації опроміненого зразка показала форму, відповідну реакції на розрив крихкої тривимірної аморфної смоли в склоподібному стані.

3.2. Провідники

Працездатність кабелів і проводів під дією ІВ визначається в основному властивостями електроізоляційних матеріалів, впливом радіації на мідні (а також сталеві, алюмінієві, латунні і срібні) провідники можна знехтувати [14].

В металах енергія, яку «розтрачує» радіація на збудження атомарних електронів, переважно перетворюється в тепло, не створюючи дефектів структури. Електричний опір металів або сплавів зростає за рахунок утворення дефектів, хоча в сплавах можливе зменшення електроопору, якщо радіаційний вплив призводить до впорядкування структури. Оскільки метали представляють собою остов із позитивних іонів, занурених в електронний газ, то збудження й іонізація, викликані випромінюванням, не чинять ніякого впливу на електричні і магнітні властивості металів [7].

3.3. Напівпровідники

Для загальнопромислових застосувань, інтегральні мікросхеми і силові напівпровідникові пристрої виготовляють із кремнію. Під дією ІВ в структурі напівпровідників відбувається утворення термостабільних радіаційних центрів, що призводить до зміни основних електрофізичних параметрів напівпровідникових пристроїв. Подібні зміни пристроїв можуть істотно впливати на роботу системи в залежності від їх функції в схемі.

Згідно [15], основними механізмами пошкодження кремнієвих напівпровідникових пристроїв та інтегральних мікросхем від дії ІВ є зміна часу життя неосновних носіїв заряду (2), зміна питомого опору (3) і зміна рухомості й швидкості рекомбінації носіїв заряду. Вирішальною причиною зміни параметрів напівпровідникових пристроїв є зростання швидкості об'ємної рекомбінації або зменшення часу життя неосновних носіїв заряду. Радіаційна чутливість матеріалу є емпіричним коефіцієнтом K_T , що характеризує швидкість зміни часу

життя неосновних носіїв заряду в базі p - n структури при опромінюванні:

$$K_{\tau} = \frac{d}{d\Phi} \left(\frac{1}{\tau(\Phi)} - \frac{1}{\tau(0)} \right), \quad (2)$$

де Φ – інтегральний потік опромінювання; $\tau(0)$ і $\tau(\Phi)$ – час життя неосновних носіїв заряду до і після опромінювання.

$$\rho_{rad} = \rho_0 \cdot \exp(K_{\rho} \Phi), \quad (3)$$

де ρ_0 , ρ_{rad} – питомі опори напівпровідникового матеріалу до і після опромінювання інтегральним потоком Φ ; K_{ρ} – коефіцієнт, що характеризує швидкість зростання питомого опору при опромінюванні.

Коефіцієнт K_{ρ} обернено пропорційний до вихідної концентрації носіїв заряду і прямо пропорційний швидкості їх видалення при опроміненні (4).

$$K_{\rho} = \frac{1}{n_0} \cdot \frac{\Delta n}{\Phi}, \quad (4)$$

де n_0 – вихідна концентрація носіїв заряду; $\Delta n/\Phi$ – швидкість видалення при опромінюванні.

Відповідно до [15] початкові стадії деградації параметрів найменш радіаційно-стійких напівпровідникових пристроїв починаються із дози в 1 крад, сильна деградація і функціональна відмова настає при поглиненні доз в 10 Мрад для радіаційно-стійких пристроїв.

В результаті досліджень [16] виявлено, що характерними пошкодженнями напівпровідникових пристроїв є:

- пробій і структурні пошкодження бар'єрів Шоттки;
- деградація параметрів транзисторів;
- зниження струмів пристроїв;
- зниження крутизни вольт-амперних характеристик транзисторів і їх вихідної потужності;
- втрата інформації в цифрових інтегральних схемах;
- зміна амплітуди вихідних сигналів генераторів електричних імпульсів;
- збої в роботі обчислювальних пристроїв, порушення нормального ходу обчислювальної програми, спотворення і втрата інформації.

В [17] детально розглянуто вплив ІВ на арсенід галію, проте в системі електроприводу цей матеріал зустрічається лише в складі оптронів, тому допустимо розглянути вплив ІВ відразу на пристрій, а не на його складовий матеріал. Базовим параметром оптрона є коефіцієнт передачі за струмом CTR (Current Transfer Ratio), який визначається відношенням вихідного струму до вхідного:

$$CTR = I_{вих} / I_{вх}. \quad (5)$$

Експериментальні дослідження [18, 19] демонструють монотонне зниження CTR до нуля при досягненні поглиненої дози 0,1 Мрад для оптрона на базі фототранзистора і 1 Мрад – на базі фотодіода.

3.4. Діелектрики

На об'єктах з підвищеними рівнями радіації першорядне значення мають матеріали ізоляції і оболонки. Основними механізмами, що приводять до негативних наслідків, є: нагрівання внаслідок поглинання випромінювання, структурні радіаційні дефекти і деполімеризація, включаючи підвищене випаровування пластифікатора. Як наслідок - прискорене руйнування ізоляції і оболонки, що може призвести до пробою і короткого замикання.

Радіаційна стійкість склотекстолітів визначається природою сполучного матеріалу і в значній мірі типом наповнювача. Найбільш високу радіаційну стійкість мають матеріали на основі термореактивних смол з наповнювачем з склотканини, механічна міцність яких при опроміненні спочатку може істотно зростати. Низьку радіаційну стійкість мають високочастотні шаруваті пластики на основі фторопласта-4, поглинена доза випромінювання яких не перевищує 1 Мрад. У склопластиків механічні властивості починають помітно змінюватися при поглинених дозах випромінювання порядку $10^8 - 10^9$ рад, а у текстолітів на текстильній основі і гетинаксів – при дозах випромінювання $10^6 - 10^7$ рад. [11]

При використанні в умовах опромінення ізоляції кабелів, приладів, корпусів і інших виробів з фторполімерів, полівінілхлоридних матеріалів, пресматеріалів, гум виникають труднощі, зумовлені виділенням агресивних по відношенню до металів продуктів радіолізу (галоїдов, сірки, аміаку, сірковмісних сполук). У фторопласта-3 найбільш інтенсивні виділення агресивних продуктів радіолізу починається з поглиненої дози випромінювання 10^6 рад, для полівінілхлориду – з дози 10^7 рад. Особливим видом радіаційних ушкоджень є електричний пробій твердих діелектриків, який виникає без подачі зовнішньої напруги. Такий пробій виникає при впливі на діелектрик заряджених частинок, якщо довжина їх пробігу менше товщини діелектрика. В цьому випадку відбувається накопичення електричного заряду в обсязі матеріалів з подальшим розрядом. [11].

Граничні значення доз радіації, які викликають значну зміну фізико-механічних і електричних властивостей діелектриків коливаються від 1 Мрад для кремнійорганічної гуми до 1 Град для поліаміду. Кабелі з не радіаційно-модифікованою поліетиленовою ізоляцією та полівінілхлоридною захисною оболонкою можуть працювати при дозах радіації до 10 Мрад [14].

Найменшу радіаційну стійкість мають органічні діелектрики, однак сучасні виробники їх не використовують, тому розглядалися лише неорганічні діелектрики.

3.5. Магнітні матеріали

До них відносять постійні магніти (найпоширеніші – феритові і неодимові) і магнітопроводи ма-

шин і датчиків (шихтована електротехнічна сталь). Згідно [20] при опроміненні гамма квантами дозою 10^7 рад починається радіаційна зміна магнітної проникності осердя котушок індуктивності. В дослідженні [21] показана незначна зміна петлі магнітного гістерезису неодимового магніту. Оскільки магнетиками є метали (постійні магніти – сплави неодиму з бором і залізом, оксиду заліза з феритом барію або стронцію; магнітопроводи – електротехнічна сталь), а згідно п. 3.2. [7], іонізація, викликана випромінюванням, не впливає на електричні і магнітні властивості металів. Отже, можна вважати, що радіаційне випромінювання не чинить впливу на магнітні властивості металів.

3.6. Пасивні елементи електричних кіл

Дія ІВ на резистори проявляється у оборотних і необоротних змінах значення опору, зростанні рівня шумів, погіршується вологостійкість. Основною причиною таких змін є різке збільшення провідності, викликане іонізаційними ефектами в матеріалах. Найстійкішими є керамічні та дротяні резистори. У конструкції цих резисторів використовуються лише радіаційно-стійкі матеріали: метал, кераміка, скло. Так, опромінення дротяних резисторів нейтронами потоком 10^{19} $1/см^2$ призводить до необоротного збільшення опору (менш ніж на 2% від вихідної величини). Менш стійкі до ІВ є металоплівкові і плівкові вуглецеві резистори. При їх опроміненні одночасно швидкими, тепловими, надтепловими нейтронами (відповідно: 10^{14} , 10^{18} , 10^{16} $1/см^2$) і гамма-випромінюванням (10^8 рад) відзначено поступове збільшення опору на 3,5% при цьому незворотні зміни становлять менше 2%. Стійкість до вологи, рівень шумів і температурний коефіцієнт резисторів після опромінення не змінюються. Композиційні резистори в рівній мірі нестійкі до корпускулярного і фотонного випромінювання. Тривала дія нейтронів 10^{14} $1/см^2$ або гамма-випромінювання дозою 10^8 рад призводить до зниження вологостійкості, зростанню рівня вла-

стих шумів в 2 рази, зміни номінального омичного опору на 10%. [22]

У конденсаторів під дією радіації змінюються параметри електричної міцності (робоча напруга і температурних коефіцієнт); опір ізоляції, відповідно струм витоку; діелектричні втрати (визначають величину активної потужності, що виділяється в конденсаторі). Гамма випромінювання викликає оборотні радіаційні дефекти. Нейтронне випромінювання викликає як оборотні так і незворотні радіаційні дефекти. Найстійкішими до ІВ є конденсатори з неорганічним діелектриком (кераміка, склоемаль, слюда Зміна параметрів при опроміненні нейтронами до 10^{16} $1/см^2$ і впливі гамма-випромінювання до 10^9 рад не перевищує часток або одиниць відсотків (виняток становлять низькочастотні сегнето-керамічні конденсатори, зміна їх ємності досягає 25%) Менш ніж через 2 години після закінчення опромінення параметри керамічних, склоемалевих і слюдяних конденсаторів відновлюються до вихідних [22]. Гамма-випромінювання викликає в основному оборотні радіаційні дефекти. При опроміненні нейтронами можливі як оборотні, так і необоротні радіаційні дефекти.

Радіаційна стійкість котушок індуктивності визначається ступенем пошкодження матеріалів. Котушки без осердя і плівкові спіральні котушки найстійкіші до ІВ. За рахунок радіаційної зміни активного опору котушки індуктивності, незначно змінюється добротність. Однак цей ефект проявляється при опромінюванні нейтронами з потужністю дози порядку 10^{18} $1/(с \cdot см^2)$. Індуктивність плівкових спіральних котушок з феромагнітними плівками при опроміненні гамма квантами дозою 10^7 рад зменшується за рахунок радіаційної зміни магнітної проникності осердя [20].

Для наочної демонстрації радіаційної стійкості складових елементів електроприводу побудовано гістограму (рис. 3).

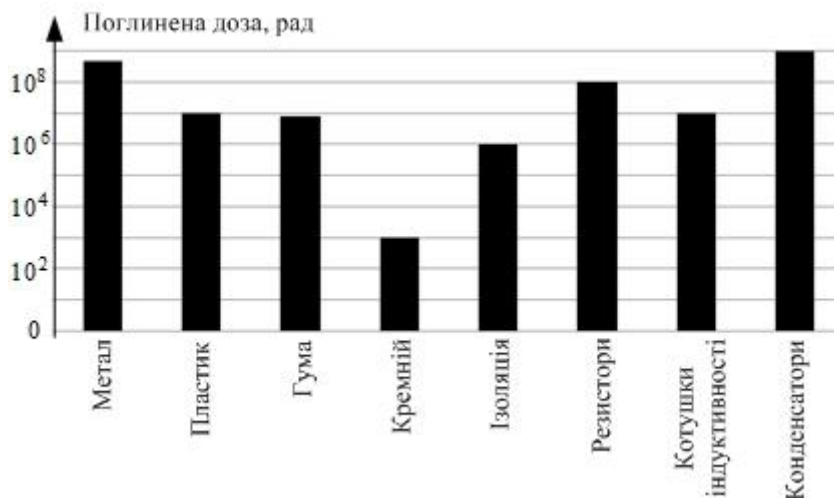


Рисунок 3 – Гістограма радіаційної стійкості матеріалів і пасивних елементів електричних кіл

Стовпці гістограми відповідають величинам поглиненої дози, при якій не відбуваються зміни параметрів ланок електроприводу. Оскільки монотонна деградація мастил і оптронів відбувається із початком опромінювання, вони не зображені на рис.3, тому що представляли б собою стовпці нульової величини. Через те, що при дозі 2 крад відбувається “насичення” радіаційних змін мастильних матеріалів і вони мають незначний характер, ними можна знехтувати. Для оптронів, навпаки, граничною величиною поглиненої дози є 10^5 рад, після чого настає функціональна відмова.

Згідно із рис. 3 очевидно, що найнижчу радіаційну стійкість має кремній, а відповідно усі напівпровідникові пристрої. Електропривод є послідовною системою, див рис.1, а як відомо, в системі з послідовною структурою відмова будь-якого компонента призводить до відмови системи в цілому. Тому, для забезпечення надійної роботи електроприводу доцільно або підвищувати радіаційну стійкість напівпровідникових елементів, або розробляти методи програмної компенсації негативного впливу ІВ.

ВИСНОВКИ: В подальших дослідженнях впливу іонізуючого випромінювання на частотно-регульований електропривод доцільно звернути особливу увагу на поведінку його напівпровідникових компонентів. Так як дослідження радіаційної стійкості логічних інтегральних мікросхем є окремою складною задачею і проводяться теоретичні і експериментальні роботи по їх радіаційному захисту, суттєвим можна вважати дослідження поведінки силового каналу перетворювача частоти від поглиненої дози іонізуючого випромінювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Носовський А. В. Поводження з радіоактивними відходами. К.: Техніка, 2007. 368 с.
2. Ковчин С. А., Сабинин Ю. А. Теория электропривода: уч. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 2000. 496 с.
3. Буриев Н. Н., Буриев Н. Т. Внешнее излучение комбинированного хранилища радиоактивных отходов. *Международный научный журнал «Символ науки»*. 2016. (№10-1). С. 18–20.
4. Буриев Н. Н., Буриев Н. Т., Хасанов Т. А. Внешнее излучение законсервированного хранилища твердых радиоактивных отходов. *Международный научный журнал «Символ науки»*. 2016. (№10-1). С. 17–18.
5. Погосов А. Ю., Дубковский В. А. Ионизирующая радиация: радиоэкология, физика, технологии, защита: уч. Одеса: Наука и техника, 2012. 804 с.
6. Плачкова С. Г. Электроэнергетика и охрана окружающей среды. Функционирование энергетики в современном мире. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5> (дата звернення 26.02.2020).
7. Бекман И. Н. Радиоактивность и радиация: конспект лекций. URL:
8. Введение в дозиметрию и защита от ионизирующих излучений: уч. Санкт-Петербург: издательство Политехнического университета, 2008. 145 с.
9. Роках А. Г. Действие ионизирующих излучений на полупроводниковые материалы и приборы: конспект лекций по курсу «Действие ионизирующих излучений на полупроводниковые материалы и структуры», Саратов: СГУ, 60 с.
10. Овчинников И. И., Овчинников И. Г., Богина М. Ю., Матора А. В. Влияние радиационных сред на механические характеристики материалов и поведение конструкций (обзор). *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2012. №4. С. 1–39.
11. Смирнов С. Н., Герасимов Д. Н. Радиационная экология. Физика ионизирующих излучений: уч. URL: http://ftemk.mpei.ac.ru/ctlw/pubs/etm_re/radiationf/06.04.htm (дата звернення: 10.03.2020).
12. Жосан А. А., Ревякин М. М., Головин С. И. Влияние гамма-излучения на эксплуатационные свойства моторных масел на минеральной основе. *Электронная обработка материалов*. 2018. № 54(1), С. 75–79.
13. Kopal I. The Effect of High-Energy Ionizing Radiation on the Mechanical Properties of a Melamine Resin, Phenol-Formaldehyde Resin, and Nitrile Rubber Blend. *Materials (Basel)*. 2018. №11(12).
14. Беспрозванных А. В., Набока Б. Г., Морозова Е. В. Радиационная стойкость кабелей внутренней прокладки общепромышленного применения. *Электротехника и Электромеханика*. 2006. № 3. С. 82–86.
15. Безродних І. П., Тютнев А. П., Семенов В. Т. Радиационные эффекты в космосе Часть 3 Влияние ионизирующего излучения на изделия электронной техники. М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. 64 с.
16. Венедитов М. М., Оболенская Е. С., Киселев В. К., Оболенский С. В. Оценка воздействия ионизирующих излучений на электронные компоненты по результатам испытаний ограниченных выборок. *Журнал радиоэлектроники*. 2017. № 1. С. 1684–1719.
17. Вологдин Е. Н., Лисенко А. П. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов: уч. Москва. 2000. 92 с.
18. Label K. A. A Compendium of Recent Optocoupler Radiation Test Data. *Conference: Radiation Effects Data Workshop*. 2000.
19. Johnston A. H. The Effects of Space Radiation on Optocouplers. *California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory; California Institute of Technology, Pasadena, California; USA- 91 109*.
20. Федоров В., Сергеев Н., Кондрашин А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств М.: Техносфера, 2005. 502 с.

21. Samin A., Kurth M., Lei R. Cao An analysis of radiation effects on NdFeB permanent magnets. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2015. № 342. С. 200-205.

22. Корнилов А. Г. Вопросы конструирования электронной аппаратуры: конспект лекций. КГТУ им. А.Н. Туполева. Казань. 2004. 92 с.

23. Сидоренко В. Л., Азаров С. І. Концептуальні засади розробки системи комплексного моніторингу зони радіаційної аварії. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. № 1. С. 82–87.

OVERVIEWING THE RADIATION STABILITY OF CONVENTIONAL FREQUENCY-CONTROLLED ELECTRIC DRIVE COMPONENTS

A. Chermalykh, D. Muhenov

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

vul. Borshchahivska, 115/3 korp. 22, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: danila8902@gmail.com

Purpose. This paper aims, first, to determine the radiation stability of a conventional industrial bridge crane hoist frequency-controlled electric drive for nuclear waste disposal. Secondly, to identify the most sensitive to ionizing radiation elements of the electric drive system. **Methodology.** To achieve this goal, the design of the electric drive was considered. It was determined what materials each element of the actuator consists of and what function it performs. To find out the effect of ionizing radiation, an accounting value was established. The influence of ionizing radiation on the properties of electric drive materials depending on the absorbed dose is revealed by the method of literature review. **Findings.** It was determined that silicon has the lowest radiation resistance among the materials that make up the electric drive. Logic circuits and power keys are made of various conductivity silicon pieces. High dynamic performance of modern electric drives is achieved through the use of power semiconductor devices. Radiation-caused changes of the semiconductor switches parameters will inevitably lead to a change in the output characteristics of the actuator. **Originality.** For the first time, the common industrial frequency-controlled electric drive radiation stability analysis has been carried out. The most sensitive to ionizing radiation components of the frequency-controlled electric drive system are revealed. An electric drive is a sequential system, so failure of any component of the system will result in failure of the entire electric drive system. The absorbed dose threshold value for acting the system in normal mode is determined. **Practical value.** The results show that in the further studies of the frequency-controlled electric drives radiation stability priority should be given to semiconductor devices. It is revealed that the optocoupler parameter degradation begins with the start of irradiation. This is salient because optocouplers are used in important parts such as encoders and transistor control drivers. Their functional failure occurs at a dose of 1 Mrad, so software of radiation-caused compensating devices is limited by this dose. In order to increase radiation resistance, it is advisable to abandon optocouplers in favor of electromagnetic induction devices, since their radiation stability is two orders of magnitude higher. References 23, figures 3.

Key words: actuator, components, semiconductors, operability, radiation, stability.

REFERENCES

1. Nosovskij, A. V. (2007), Radioactive waste management, K.: Tehnika, 368 p.

2. Kovchin, S. A., Sabinin, Ju. A. (2000), Electric drive theory, Sankt-Peterburg: Energoatomizdat, 496 p.

3. Buriev, N. N., Buriev, N. T. (2016), “External radiation from a combined storage facility for radioactive waste”, *Simvol nauki*, no. 10, pp. 18-20.

4. Buriev, N. N., Buriev, N. T., Hasanov, T. A. (2016), “External radiation of the preserved solid radioactive waste storage facility”, *Simvol nauki*, no. 10, pp. 17-18.

5. Pogosov, A. Ju., Dubkovskij, V. A. (2012), Ionizing radiation: radioecology, physics, technology, protection, Odesa: Nauka i tehnika, 804 p.

6. Plachkova, S. G. “Electricity and environmental protection. The functioning of energy in the modern world”, available at: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5> (accessed: 26.02.2020).

7. Bekman, I. N. “Radioactivity and radiation: lecture notes”, available at: <http://profbeckman.narod.ru/RR0.htm> (accessed: 04.03.2020).

8. Introduction to dosimetry and protection against ionizing radiation (2008), Sankt-Peterburg, 145 p.

9. Rokah, A. G. “The effect of ionizing radiation on semiconductor materials and devices: lecture notes on the course «The effect of ionizing radiation on semiconductor materials and structures»”, Saratov: SGU, 60 p.

10. Ovchinnikov, I. I., Ovchinnikov, I. G., Bogina, M. Ju., Matora, A. V. (2012), “The influence of radiation media on the mechanical characteristics of materials and the behavior of structures (review)”, *Naukovedenie*, no. 4, pp. 1-39.

11. Smirnov, S. N., Gerasimov, D. N. “Radiation Ecology. Physics of ionizing radiation”, available at: http://ftemk.mpei.ac.ru/ctlw/pubs/etm_re/radiationf/06_04.htm (accessed: 10.03.2020).

12. Zhosan, A. A., Revjakin, M. M., Golovin, S. I. (2018), “The effect of gamma radiation on the performance properties of mineral-based motor oils”, *Elektronnaja obrabotka materialov* [Electronic material processing], no. 54(1), pp. 75–79.

13. Kopal, I. (2018), “The Effect of High-Energy Ionizing Radiation on the Mechanical Properties of a Melamine Resin, Phenol-Formaldehyde Resin, and

Nitrile Rubber Blend”, *Materials (Basel)*, no. 11(12).

14. Besprozvannyh, A. V., Naboka, B. G., Morozova, E. V. (2006), “Radiation resistance of indoor cables for general industrial use”, *Elektrotehnika i Elektromehanika* [Electrical Engineering and Electromechanics], no. 3, pp. 82–86.

15. Bezrodnih, I. P., Tjutnev, A. P., Semenov, V. T. (2017), Radiation effects in space. Part 3 The effect of ionizing radiation on electronic products, M.: AO «Korporacija «VNIIJeM», 64 p.

16. Veneditov, M. M., Obolenskaja, E. S., Kiselev, V. K., Obolenskij, S. V. (2017), “Evaluation of the effects of ionizing radiation on electronic components based on limited sampling results.”, *Zhurnal radioelektroniki* [Radioelectronics magazine], no. 1, pp. 1684-1719.

17. Vologdin, E. N., Lisenko, A. P. (2000), Integrated radiation changes in the parameters of semiconductor materials, Moscow, 92 p.

18. Label, K. A. (2000), “A Compendium of Recent Optocoupler Radiation Test Data”, Conference: Radiation Effects Data Workshop.

19. Johnston, A. H. (2000), “The Effects of Space Radiation on Optocouplers”, California Institute of Technology, Pasadena, California; USA, pp. 91–109.

20. Fedorov, V., Sergeev, N., Kondrashin, A. (2005), Monitoring and testing in the design and manufacture of electronic equipment, Moscow, 502 p.

21. Samin, A., Kurth, M., Lei, R. C. (2015), “An analysis of radiation effects on NdFeB permanent magnets”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, no. 342. pp. 200-205.

22. Kornilov, A. G. (2004), Electronic equipment design issues: lecture notes, KGTU im. A.N. Tupoleva, Kazan'. 92 p.

23. Sidorenko, V. L., Azarov, S. I. (2017), “Conceptual bases of development of system of complex monitoring of radiation accident zone”, *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrograds'koho* [Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University], no. 1, pp. 82-87.

Стаття надійшла 02.04.2020.