

Національний університет
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”

National University
“Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

СИСТЕМИ управління, навігації та зв'язку

Control, navigation and communication systems

Випуск 1 (79)

Issue 1 (79)

Щоквартальне видання

Засноване у 2007 році

У журналі відображені результати наукових досліджень з розробки та удосконалення систем управління, навігації та зв'язку у різних проблемних галузях.

Засновник і видавець:

Національний університет
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”

Телефон:

+38 (050) 302-20-71

E-mail редколегії:

kuchuk_nina@ukr.net

Інформаційний сайт:

<http://journals.nupp.edu.ua/sunz>

Quarterly

Founded in 2007

Journal represent the research results on the development and improvement of control, navigation and communication systems in various areas

Founder and publisher:

National University
“Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

Phone:

+38 (050) 302-20-71

E-mail of the editorial board:

kuchuk_nina@ukr.net

Information site:

<http://journals.nupp.edu.ua/sunz>

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор

*Журнал індексується міжнародними наукометричними базами: Index Copernicus (ICV = **82.05**),
General Impact Factor, Google Scholar, Academic Resource Index, Scientific Indexed Service*

*Затверджений до друку Вченою Радою Національного університету
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” (протокол від 12 березня 2025 року № 5).*

*Ідентифікатор медіа R30-04135 згідно з рішенням Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення від 25.04.2024 № 1416*

Включений до “Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії” до категорії Б – наказами МОН України від 17.03.2020 № 409 та від 09.02.2021 № 157

Полтава • 2025

А. С. Янко, О. О. Крук, С. О. Гончаренко

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ БЕЗВІДМОВНОСТІ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПЛАТФОРМ У СИСТЕМІ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ

Анотація. У статті розглянуто актуальну проблему забезпечення безвідмовності систем обробки інформації (СОІ) автоматизованих робототехнічних платформ (АРП) в умовах радіоелектронної боротьби (РЕБ). Обґрунтовано необхідність розробки ефективних методів захисту СОІ АРП від електромагнітних загроз. Проаналізовано існуючі підходи до підвищення надійності СОІ, зокрема використання резервування та сучасних інформаційних технологій. Зазначено, що традиційні методи захисту часто є недостатніми для протидії сучасним засобам РЕБ. У зв'язку з цим, запропоновано альтернативний підхід до створення математичного забезпечення СОІ АРП, спрямований на підвищення відмовостійкості, живучості та безвідмовності на основі використання модульності конструкції обчислювальних трактів СОІ та самокорегуючих властивостей непозиційних кодових структур системи залишкових класів (СЗК). Детально досліджено властивості СЗК, які роблять їх перспективними для застосування в СОІ АРП, зокрема можливість адаптації до вирішуваних завдань залежно від вимог до точності, швидкодії та надійності обчислень. Наголошено на можливості змінювати кількісне співвідношення між числом інформаційних та контрольних модулів у процесі вирішення задачі та гнучко використовувати резерви точності та надійності СОІ. Розроблено математичну модель безвідмовності СОІ АРП у СЗК, яка враховує особливості функціонування системи та вплив зовнішніх факторів. Описано структуру СОІ у СЗК, визначено основні фактори, що впливають на безвідмовність, та сформульовано математичні залежності між ними. Наведено алгоритм розрахунку ймовірності безвідмовної роботи СОІ. Результати дослідження, представлені в роботі, можуть бути використані для розробки та впровадження більш ефективних методів захисту АРП від РЕБ, що сприятиме підвищенню їх надійності та безпеки функціонування в складних умовах сучасного поля бою. Запропонована математична модель є ефективним інструментом для визначення надійної характеристики СОІ АРП, а саме ймовірності безвідмовного функціонування, та дозволяє оцінити вплив різних факторів на надійність СОІ та оптимізувати параметри системи для досягнення необхідного рівня захисту в умовах РЕБ.

Ключові слова: автоматизована робототехнічна платформа, перехідна ймовірність безвідмовного функціонування, показники надійності, радіоелектронна боротьба, система залишкових класів, система обробки інформації.

Вступ

В умовах сучасного поля бою, де радіоелектронна боротьба (РЕБ) набуває все більшого значення, забезпечення ефективного функціонування автоматизованих робототехнічних платформ (АРП) є критично важливим завданням. Сучасні засоби РЕБ здатні не тільки створювати потужні перешкоди, що унеможливають зв'язок та керування АРП, але й здійснювати інтелектуальні атаки, спрямовані на спотворення даних, підміну сигналів та навіть захоплення керування платформою. Враховуючи потенційні загрози порушення функціонування, втрати керування та навіть фізичного знищення АРП внаслідок впливу РЕБ, розробка та впровадження ефективних методів захисту є першочерговим завданням.

Життєздатність, мобільність та прихованість платформи в зоні виконання бойового завдання, а також її стійкість до засобів РЕБ противника, є ключовими факторами успіху. АРП повинні бути здатними не тільки протистояти безпосередньому впливу РЕБ, але й зберігати свою функціональність в умовах інформаційної ізоляції, коли зв'язок з оператором є обмеженим або відсутнім. Це вимагає розробки та інтеграції на борту АРП систем автономного керування, навігації та прийняття рішень, які базуються на захищених каналах зв'язку та інформації.

У зв'язку з цим, дослідження в області захисту АРП в умовах РЕБ, що узгоджуються зі Стратегією розвитку оборонно-промислового комплексу Украї-

ни, представляють значну наукову та практичну цінність. Стратегія розвитку ОПК України визначає пріоритетні напрями розвитку озброєння та військової техніки, серед яких забезпечення інформаційної безпеки та стійкості до впливу РЕБ займає одне з провідних місць. Дослідження в цій галузі спрямовані на створення інноваційних технологій та систем, здатних забезпечити надійний захист АРП в умовах сучасного електромагнітного поля бою, сприяючи зміцненню оборонного потенціалу країни.

Постановка проблеми. В умовах сучасних військових операцій, де домінуючим фактором є електромагнітне поле бою, забезпечення безперебійного функціонування та стійкості АРП до різноманітних електромагнітних загроз є першочерговим завданням. Ефективне керування наземними робототехнічними платформами часто ускладнюється нестабільністю зовнішніх умов, що негативно впливає на оперативність та надійність управління. Вирішення цієї проблеми потребує розробки та впровадження інноваційних підходів до керування, які базуються на надійній системі обробки інформації та забезпечують захист платформ в умовах РЕБ. Незважаючи на значний прогрес у створенні сучасних апаратно-програмних засобів для систем управління та зв'язку, низка питань у цій сфері залишається актуальною та потребує подальшого дослідження. Оскільки традиційні методи захисту часто є недостатніми для протидії сучасним засобам РЕБ. Розглянемо основні проблеми у сфері РЕБ:

1. Вразливість до ширококутних перешкод. Традиційні системи захисту часто розробляються для протидії вузькосмуговим перешкодам. Сучасні засоби РЕБ можуть створювати ширококутні перешкоди, які охоплюють широкий діапазон частот, що робить традиційні методи захисту неефективними.

2. Недостатня адаптивність. Традиційні системи захисту часто мають жорстку структуру та алгоритми, які не можуть адаптуватися до змін в умовах РЕБ. Сучасні засоби РЕБ можуть швидко змінювати свої параметри та методи впливу, що вимагає від систем захисту здатності до швидкої адаптації.

3. Залежність від частотного діапазону. Традиційні системи захисту можуть бути ефективними лише в певному частотному діапазоні. Сучасні засоби РЕБ можуть працювати в широкому діапазоні частот, що вимагає від систем захисту здатності працювати в різних частотних діапазонах.

4. Вразливість до інтелектуальних атак. Сучасні засоби РЕБ можуть використовувати інтелектуальні методи впливу, такі як імітація сигналів, створення помилкових цілей тощо. Традиційні системи захисту, які базуються на простих алгоритмах, можуть бути вразливими до таких атак.

5. Висока вартість та складність реалізації. Розробка та впровадження ефективних систем захисту від РЕБ є складним та дорогим завданням. Традиційні методи захисту можуть вимагати значних витрат на обладнання та обслуговування.

6. Обмежена ефективність проти комбінованих загроз. Сучасні засоби РЕБ можуть використовувати комбіновані методи впливу, такі як одночасне створення перешкод та використання кібернетичних атак. Традиційні системи захисту, які розроблені для протидії окремим видам загроз, можуть бути неефективними проти комбінованих загроз.

Для подолання цих проблем необхідні нові підходи до розробки систем захисту від РЕБ, які базуються на використанні сучасних технологій, таких як штучний інтелект, адаптивні алгоритми, ширококутні системи зв'язку, альтернативні математичні моделі обробки інформації та інші [1].

Критично важливим напрямом досліджень є розробка та вдосконалення надійних математичних моделей, спрямованих на мінімізацію впливу електромагнітних загроз на інформаційне середовище. Ефективним способом підвищення стійкості АРП до РЕБ є використання комбінації системи залишкових класів (СЗК) та завадостійкого кодування.

Метою роботи є обґрунтування можливості використання СЗК для підвищення рівня захисту систем обробки інформації АРП в умовах РЕБ.

Обґрунтування ефективності застосування СЗК для побудови ефективних СОІ

Складність та масштаби розв'язуваних завдань управління АРП потребує розширення функцій та можливостей засобів обчислювальної техніки, що тягне за собою збільшення обладнання АРП, ускладнення структури та математичного забезпечення систем обробки інформації (СОІ). Це, своєю чергою, викликає необхідність вжиття додаткових заходів

щодо забезпечення надійності функціонування СОІ й у першу чергу підвищення безвідмовності СОІ АРП, які мають забезпечити надійну роботу навіть за відмову її окремих елементів чи блоків, тобто. забезпечення високої живучості. Це подібно до того, як окремі ушкодження в біологічному організмі не порушують його нормальної життєдіяльності. Існує два основні шляхи підвищення надійності СОІ АРП: підвищення надійності окремих логічних елементів та запровадження різних типів надмірності (застосування різних видів резервування). Зважаючи на те, що надійність логічних елементів СОІ визначається рівнем розвитку технології, то очевидно, що введення надмірності є найбільш ефективним практичним шляхом підвищення надійності СОІ [2]. Різноманітність умов і жорсткість вимог (необхідність забезпечення високого ступеня точності, високої продуктивності функціонування СОІ АРП в реальному часі в умовах РЕБ), що накладаються на режим функціонування та експлуатації СОІ АРП, не завжди дозволяє застосовувати тимчасове та інформаційне резервування. Внаслідок цього одним із ефективних практичних методів підвищення надійності є структурне резервування на рівні дубльованої або тройованої мажоритарної структури [1].

Основний практичний шлях побудови надійних СОІ АРП, що функціонують у позиційних системах числення (ПСЧ), – створення перспективних відмовостійких архітектур, здатних до перебування за рахунок використання різних видів резервування (застосування БІС, НВІС, ПЛМ (PLD) та програмованих логічних інтегральних схем у різних функціональних блоках та вузлах СОІ) [3].

В умовах обмежень на масу, розміри та вартість бортових комп'ютерних систем та СОІ АРП, актуальним завданням є забезпечення їх надійності, живучості та стійкості до впливу електромагнітного спектра. Застосування додаткових розрядів для апаратного оперативного контролю дозволяє вирішити цю проблему, забезпечуючи гнучке керування точністю, швидкістю та надійністю обчислень. Проте, використання ПСЧ накладає певні обмеження на метод змінного масштабування, який використовується для скорочення кількості розрядів при поданні числової інформації в процесі контролю даних. Традиційні СОІ, що базуються на ПСЧ, мають низку недоліків. Зокрема, необхідність додаткових операцій зсуву перед кожним тактом виконання програми призводить до зниження швидкодії СОІ приблизно на 10%. Застосування змінного масштабування потребує значного обсягу попередніх теоретичних розрахунків для визначення оптимальних масштабних коефіцієнтів. Крім того, ефективність змінного масштабування обмежена певним класом завдань, що робить його малоприматним для СОІ, які працюють в реальному часі [4].

Отже, аналіз методів вирішення завдань АРП в умовах РЕБ показав, що на сучасному рівні розвитку технології застосування позиційних СОІ не може повністю задовольнити вимогам, що пред'являються до обчислювальних засобів реалізації систем контролю та управління даними. У зв'язку з цим виникає

проблема пошуку шляхів створення надійних, живучих та відмовостійких СОІ на основі застосування нетрадиційних систем числення.

Автори пропонують альтернативний підхід до створення математичного забезпечення СОІ АРП, спрямованими на підвищення відмовостійкості, живучості та безвідмовності на основі використання модульності конструкції обчислювальних трактів СОІ та самокорегуючі властивості непозиційних кодових структур СЗК [5], придатні для виявлення та виправлення помилок при обробці інформації в динаміці обчислювального процесу, що особливо важливо для організації відмовостійкого функціонування СОІ АРП в реальному часі [6].

Розглянемо важливу властивість системи залишкових класів (СЗК), що полягає у можливості змінювати кількісне співвідношення між числом інформаційних та контрольних (модулів) у процесі вирішення задачі та гнучко використовувати резерви точності та надійності СОІ [7]. Час, необхідний для виконання немодульної операції у СЗК, пропорційно числу інформаційних основ, тобто числу основ, що визначають точність обчислень. Переходячи до обчислень з меншою точністю, можна підвищити швидкість СОІ. Якщо деяка впорядкована СЗК розширюється шляхом додавання k основ, кожна з яких більша за основу вихідної СЗК, то мінімальна кодова відстань автоматично збільшується на величину k . Цього можна домогтися, зменшуючи кількість інформаційних основ, тобто переходячи до обчислень із меншою точністю. Отже, між коригуваними можливостями кодів СЗК і точністю обчислень існує обернено пропорційна залежність [5]. На одній і тій же СОІ можна виконувати одні й ті самі обчислення з високою точністю, але з меншим значенням надійності, інші – з меншою точністю, але з більш високим значенням надійності та швидкості.

Дана обставина вказує на можливість забезпечення необхідного рівня надійності та живучості СОІ у СЗК шляхом організації його стійкості до відмови від функціонування за рахунок застосування принципу адаптації, наприклад, на основі використання методу поступової деградації. Крім цього, апаратні засоби обробки інформації в СЗК відносяться до легко контрольованих та діагностованих. Це зумовлено специфічними особливостями подання непозиційних кодових структур у СЗК та характером прояву в них відмов та збоїв при обробці інформації. Ця особливість кодів у СЗК сприяє створенню адаптивних до відмов та збоїв архітектур СОІ, здатних до перебудови структури, що створює передумови до синтезу відмовостійких СОІ.

Таким чином, СОІ у СЗК має властивість адаптації до розв'язуваних завдань залежно від вимог, що висуваються до точності, швидкодії та надійності обчислень. СЗК можна визначити не як систему числення, а як особливу конструкцію кодової числової структури даних, тобто спеціальним чином закодований блок числових даних.

Слід зауважити, що у пропонованому підході, СЗК не протиставляється двійковою ПСЧ, а служить як би її розширенням, що дозволяє ефективно вирі-

шувати певний клас задач. Тому, можливо, найбільш ефективним, у даному випадку, представляється підхід, що поєднує у собі комбіноване застосування СЗК та двійкової ПСЧ при побудові спеціалізованих обчислювальних комп'ютерних систем та компонентів та СОІ АРП. При цьому, наприклад, керування всією комп'ютерною системою може здійснюватися звичайними двійковими командами та блоками, а обробка даних виконується на основі модулярного представлення чисел. Таким чином, використання переваг СЗК, разом з традиційними двійковими методами побудови комп'ютерних систем та компонентів, може привести до підвищення продуктивності та надійності СОІ АРП у цілому.

Математична модель безвідмовності СОІ АРП у СЗК

Розглянемо, як можна застосувати основні математичні результати теорії марківських процесів для адекватного відображення процесу функціонування СОІ АРП у СЗК, що дозволить описати загальну модель СОІ, а потім синтезувати надійну модель у СЗК і оцінити її безвідмовність.

Розглянемо СОІ у СЗК, що складається з q інформаційних (ІОТ) та одного контрольного (КОТ) $k = 1$. Кожен ІОТ має кінцеве число різних функціональних станів. Позначатимемо кінцеве число різних функціональних станів ІОТ по модулю x_z як $\chi_z = \{0, y_z\}$. Якщо в даний момент часу t ІОТ знаходяться відповідно в станах s_1, s_2, \dots, s_q , тоді стан всіх ІОТ СОІ АРП у СЗК можна визначити вектором $S = (s_1, s_2, \dots, s_q)$. Безліч станів КОТ позначимо як $\chi_k = \{0, N_k\}$, де N_k – кількість контрольних основ СЗК. Процес функціонування СОІ АРП у СЗК можна описати за допомогою вектора станів:

$$\chi(t) = \{\chi_1(t), \chi_2(t), \dots, \chi_q(t), \tilde{\chi}(t)\}, \quad (1)$$

де $\chi_z(t)$ – стан ІОТ по модулю x_z в момент часу $t \geq 0$; $\tilde{\chi}(t)$ – стан ІОТ по модулю x_{q+1} , за умови, що розглядається СЗК лише з однією контрольною основою.

У випадку процес функціонування СОІ АРП у СЗК відбувається в такий спосіб, що у заданому інтервалі часу стан КОТ не змінюється та зберігає постійне значення $\tilde{\chi}(t) = const$.

Вектор $\chi(t)$ станів ІОТ зберігається незмінним протягом випадкового проміжку часу, що відповідає тривалості виконання елементарних арифметичних операцій t' (додавання, віднімання, множення), розподіленого за показовим законом із параметром λ_z інтенсивності відмови z – го функціонуючого обчислювального тракту (ОТ). Вектор станів $\tilde{\chi}(t)$ змінюється миттєво від значення $\tilde{\chi}(t)$ до значення $\tilde{\chi}_k(t)$. Еволюція КОТ (або резервного ОТ (РОТ)) в інтервалі часу одного циклу функціонування $[t_z, t_{z+1}]$ відбувається незалежно від процесу контролю та виправлення помилки (збою), здійснювано-

го КОТ. Отже, умовна ймовірність того, що в момент t_{z+1} вектор станів групи РОТ $\tilde{\chi}'(t_{z+1}-0)$ прийме значення v , при тривалості $(z+1)$ -го циклу функціонування, за умови, що $\tilde{\chi}(t_z) = k$, $\tilde{\chi}'(t_z) = z$, можна визначити за формулою:

$$\bar{P}_{zv}(t) = \int_0^t [P_{zv}(\theta)F]d\theta, \quad (2)$$

де $P_{zv}(\theta)$ – ймовірність того, що однорідний ланцюг Маркова перейде за час θ зі стану z у стан v .

У момент часу t_{z+1} відбувається миттєва зміна стану РОТ (КОТ) СОІ АРП у СЗК.

Розглянемо СОІ АРП у СЗК, в якій всі ОТ рівнонадійні, причому кількість ІОТ (робочих) дорівнюватиме q , два ОТ вважатимемо контрольними (КОТ), вони служать для контролю та діагностики СОІ АРП у СЗК, і r резервних (РОТ) ВТ, що грають роль резервних елементів. Для такої системи ($\lambda_z = \lambda$) сумарна робота, що виконується СОІ АРП у СЗК за час t , визначиться як:

$$W(t) = \int_0^t g[X(\theta)]d\theta, \quad (3)$$

де $g(z)$ – продуктивність СОІ АРП при одночасному працездатному стані z ІОТ.

Розглянемо набір з q ІОТ як один ІОТ по модулю $X = \prod_{z=1}^q x_z$, в момент часу t стан цього ІОТ $\chi(t)$, а набір з r РОТ – як один РОТ по модулю $X' = \prod_{z=q+1}^{q+2+r} x_z$, вважаючи, що в момент часу t даний РОТ може перебувати в стані $\tilde{\chi}(t) = 0$ в залежності від станів ОТ. У цьому випадку перехідні ймовірності $P(t)$ станів СОІ у СЗК можна визначити за відомими математичними співвідношеннями [8].

Розглянемо модель СОІ АРП у СЗК, де одночасно може функціонувати $q+2$ із загальної кількості

$$\begin{aligned} P_{zv}(t) &= \int_0^t P_{(q+2)v}(t-\theta) dU_{z-q-2}[\lambda(q+2), \dots, \lambda(q+2), \theta] = \int_0^t \left\{ P_{(q+2)v}(t-\theta) \cdot e^{-\lambda(q+2)\theta} \cdot \frac{\lambda(q+2) \cdot [\lambda(q+2) \cdot \theta]^{z-q-3}}{(z-q-3)!} \right\} d\theta = \\ &= \int_0^t \left\{ P[(q+2), v, e^{-\lambda(t-\theta)}] \cdot e^{-\lambda(q+2)\theta} \cdot \frac{[\lambda(q+2) \cdot \theta]^{z-q-3}}{(z-q-3)!} \right\} d\theta = \int_0^t \left\{ C_{q+2}^v \cdot P^v (1-P)^{q+2-v} \cdot e^{-\lambda(q+2)\theta} \cdot \frac{[\lambda(q+2) \cdot \theta]^{z-q-3}}{(z-q-3)!} \right\} d\theta. \end{aligned} \quad (6)$$

Значимо, що отриманий вираз (6) є робочою формулою для визначення перехідних ймовірностей безвідмовного функціонування СОІ АРП у СЗК з q інформаційними основами та двома контрольними основами.

Приватні варіанти надійності моделей СОІ АРП у СЗК були розглянуті в рамках НДР.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує, що для отримання та аналізу надійних характеристик СОІ АРП у СЗК доцільно використовувати відомі в тео-

$q+2+r$ ОТ, тобто активні $q+2$ ОТ, а r ОТ перебувають у резерві. У момент відмови ІОТ_z замість нього за допомогою комутатора (автомата надійності) підключається РОТ_z (зазначимо, що $x_z < x_{z+1}$). Таким чином, режим стійкості до відмови СОІ АРП у СЗК реалізується методом заміни. Якщо резерв РОТ вичерпано, тоді СОІ АРП у СЗК продовжує функціонувати в режимі живучості (режим поступової деградації).

У момент часу t для СОІ АРП у СЗК між числом $\chi(t)$ працездатних ОТ та числом $\beta(t)$ працюючих ОТ встановлюється таке співвідношення:

$$\beta(t) = \psi[\chi(t)], \quad (4)$$

де $\psi(z) = q+2$, при $q+2 \leq z \leq q+2+r$; $\psi(z) = z$, при $0 \leq z < q+2$.

Нехай набір РОТ розглядатимемо як один по модулю $X = \prod_{z=1}^q x_z$ ($\chi(t)$ – стан цього РОТ у момент часу t).

Якщо РОТ по модулю x_z знаходиться у стані $\chi_z(t)$ (тобто у працездатному стані), то за час θ РОТ по модулю x_z може перейти тільки в один із можливих станів $0 \leq v \leq z$ (відмовили $z-v$ РОТ). Якщо $0 \leq v \leq z \leq q+2$, тоді перехідну ймовірність $P_{zv}(t)$ можна визначити за відомими співвідношеннями [8].

Якщо $q+2 \leq v \leq z$, то перехідні ймовірності можна визначити за допомогою такого виразу:

$$\begin{aligned} P_{zv}(t) &= P[z-v, (q+2)\lambda t] = \\ &= e^{-(q+2)\lambda t} \cdot \frac{[(q+2)\lambda t]^{z-v}}{(z-v)!}. \end{aligned} \quad (5)$$

Якщо $0 \leq v < q+2 \leq z$, то у загальному вигляді можна визначити перехідні ймовірності $P_{zv}(t)$, використовуючи той факт, що перехід зі стану z в стан v можливий через стан $q+2$, тобто:

рії систем з частковим обслуговуванням та традиційні моделі функціонування СОІ у ПСЧ (наприклад, модель загибелі), а також математичні формули та співвідношення (1) – (6) з урахуванням властивостей та специфіки подання та обробки даних у СЗК.

Важливим аспектом є врахування стану, в якому знаходиться РОТ, надійність перемикаючих пристроїв, способу підключення обчислювальних трактів СОІ АРП, що функціонують у СЗК.

Наприклад, для аналізу безвідмовності СОІ можуть бути використані різні моделі резервування,

такі як модель ковзного резервування з навантаженим резервом без урахування впливу надійності пристроїв, що перемикають, або модель ковзного резервування з ненавантаженим резервом з урахуванням надійності перемикаючих пристроїв.

Запропонована математична модель (6) є ефективним інструментом для визначення надійної характеристики СОІ АРП, а саме ймовірності безвідмовного функціонування. Її використання дозволяє оці-

нити вплив різних факторів на надійність СОІ та оптимізувати параметри системи для досягнення необхідного рівня захисту в умовах РЕБ.

Результати дослідження, представлені в роботі, можуть бути використані для розробки та впровадження більш ефективних методів захисту АРП від РЕБ, що сприятиме підвищенню їх надійності та безпеки функціонування в складних умовах сучасного поля бою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yanko, A., Pedchenko, N., Kruk, O. Enhancing the protection of automated ground robotic platforms in the conditions of radio electronic warfare. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 6, 2024, pp.136-142. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/136>
2. Onyshchenko S., Yanko A., Hlushko A., Sabelnikova P. Assessment of information protection level against unauthorized access. *ScienceRise*, 2, Tallinn, Estonia, 2023, pp. 36–44. <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2023.003211>
3. Янко А.С., Сабельнікова П.С. Метод виявлення та виправлення помилок на основі часових числових перерізів. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління, Баку-Харків-Жиліна, 2024, Т. 2, С. 14. <https://doi.org/10.32620/ICT.24.t2>
4. Янко А.С., Сабельнікова П.С. Дослідження методів контролю та корекції помилок інформації в комп'ютерних системах обробки даних, що функціонують в системі залишкових класів. Матеріали XXIV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій», Одеса, 18 – 19 квітня 2024, С. 143-144. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/15497>
5. Krasnobaev V., Kuznetsov A., Yanko A., Kuznetsova K. Correction Codes in the System of Residual Classes. *Proceedings of 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 488-492. <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061253>
6. Янко А.С., Філь І.В. Забезпечення відмовостійкості комп'ютерних систем на основі коригувальних властивостей непозиційних кодових структур. Тези доповідей тринадцятої міжнародної наук.-техн. конф. «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління», Баку-Харків-Жиліна, 26 – 27 квітня 2023, Т. 2, С. 51. <https://doi.org/10.32620/ICT.23.t2>
7. Краснобаев В.А., Сомов С. В., Янко. А. С. Основные свойства непозиционной системы счисления. *Системы управления, навигации та зв'язку*, 1 (25), 2013, С. 110–113.
8. Krasnobaev V., Yanko A., Fil I. Research of the possibility of fault-tolerant operation of a computer system in a non-positional number system in residual classes. *Materials of the XI International Scientific and Practical Conference "Information Control Systems & Technologies (ICST-Odessa-2023)" 21th – 23th September, 2023, Odessa.* pp. 175-177. <http://icst-conf.com/2023.pdf>

Received (Надійшла) 11.12.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.02.2025

Theoretical substantiation of a mathematical model of failure-free for the information processing system of automated robotic platforms in the residue number system

A. Yanko, O. Kruk, S. Goncharenko

Abstract. This article addresses the critical issue of ensuring the failure-free operation of information processing systems (IPS) in automated robotic platforms (ARPs) operating in conditions of electronic warfare (EW). The increasing role of ARPs in the modern world and its vulnerability to EW influences, which can lead to loss of control, data corruption, and even physical destruction of the platform, are emphasized. The necessity of developing effective methods to protect ARP IPS from electromagnetic threats is substantiated. Existing approaches to increasing the reliability of IPS, including the use of redundancy and modern information technologies, are analyzed. It is noted that traditional protection methods are often insufficient to counter modern EW means. In this regard, an alternative approach to creating mathematical support for ARP IPS is proposed, aimed at increasing fault tolerance, survivability, and reliability based on the modular design of IPS computing paths and the self-correcting properties of non-positional code structures of the residue number system (RNS). The properties of the RNS that make them promising for use in ARP IPS are studied in detail, in particular, the ability to adapt to the tasks being solved depending on the requirements for accuracy, speed, and reliability of calculations. The possibility of changing the quantitative relationship between the number of information and control modules in the process of solving the problem and flexibly using the reserves of accuracy and reliability of the IPS is emphasized. A mathematical model of the reliability of ARP IPS in the RNS is developed, which takes into account the features of the system's functioning and the influence of external factors. The structure of the IPS in the RNS is described, the main factors affecting reliability are identified, and mathematical relationships between them are formulated. An algorithm for calculating the probability of failure-free operation of the IPS is presented. The research results presented in the paper can be used to develop and implement more effective methods of protecting ARPs from EW, which will contribute to increasing its reliability and safety of operation in the difficult conditions of the modern battlefield. The proposed mathematical model is an effective tool for determining the reliable characteristics of ARP IPS, namely the probability of failure-free operation, and allows estimating the influence of various factors on the reliability of the IPS and optimizing the system parameters to achieve the required level of protection in EW conditions.

Keywords: automated robotic platform, transition probability of failure-free operation, reliability indicators, electronic warfare, residue number system, information processing system.