



✉ Correspondence author

M. Ya. Seneta

mariana.y.seneta@lpnu.ua

Article received 13.10.2023 p.

Article accepted 26.10.2023 p.

UDK 004.(05+04)

УДК 004.(05+04)

І. Г. Цмоць, Ю. В. Опотяк, М. Я. Сенета, Ю. Ю. Олійник, Н. Б. Газда, К. І. Ткачук

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

## МЕТОД ТА ЗАСОБИ ТЕСТУВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМПОНЕНТІВ МОБІЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ НА РОБОЧИХ ТАКТОВИХ ЧАСТОТАХ

Проаналізовано процеси розроблення сценаріїв тестування, вибору технологічних засобів тестування апаратного та програмного забезпечення спеціалізованих компонентів мобільної робототехнічної платформи. Досліджено методи і засоби тестування спеціалізованих компонентів мобільної робототехнічної платформи під час функціонування на робочих тактових частотах. Вдосконалено метод тестування апаратно-програмних засобів спеціалізованих компонентів мобільної робототехнічної платформи з використанням еталона, який за рахунок розроблення спеціалізованих сценаріїв і адаптації технологічного середовища до вимог конкретного застосування забезпечує поліпшення якості тестування у режимі реального часу. Показано, що основними етапами тестування спеціалізованого забезпечення на робочих тактових частотах є: розроблення плану тестування, встановлення робочої тактової частоти, створення тестового середовища, виконання тестів, порівняння результатів тестування з еталонними результатами, аналіз результатів порівняння. Для тестування розроблено два середовища та два сценарії тестування: тестування засобів шифрування та маскування команд управління мобільної робототехнічної платформи; тестування засобів демаскування і дешифрування команд управління мобільної робототехнічної платформи. Для автономного управління рухом колісної мобільної робототехнічної платформи розроблено систему нейронечіткого управління, основними компонентами якої є інтелектуальні навігаційні давачі віддалі, база правил, блоки фазифікації, прийняття рішень і дефазифікації. Розроблено структуру засобів та сценаріїв тестування блоків нейроподібного шифрування/дешифрування та маскування/демаскування команд управління мобільної робототехнічної платформи, які забезпечують спільне тестування як програмних, так і апаратних засобів на робочих тактових частотах. Розроблено структуру засобів та сценаріїв тестування системи нечіткого управління рухом мобільної робототехнічної платформи, які орієнтовані на послідовне тестування блоків фазифікації, прийняття рішень і дефазифікації та забезпечують спільне тестування як програмних, так і апаратних засобів на робочих тактових частотах у реальному часі. З використанням удосконаленого методу виконано тестування системи керування мобільної робототехнічної платформи, що підтвердило доцільність вибраного підходу.

**Ключові слова:** тестування апаратних засобів та програмного забезпечення; мобільна платформа; спеціалізовані компоненти систем; структура засобів для тестування системи.

### Вступ / Introduction

*Актуальність проблеми.* В останні десятиліття зростає зацікавленість розробленням робототехнічних платформ різноманітного призначення. Такі платформи, як правило, створюють із використанням цілої низки спеціалізованих компонентів, кожен з яких вирішує певне завдання у межах функціонування цілої платформи. Однак розроблення, створення і комплексне налаштування окремих компонентів системи потребує, окрім всього іншого, дуже уважного ставлення до тестування спеціалізованих компонентів мобільної робототехнічної платформи та налагодження їхньої взаємодії у комплексі. Не менш важливим є відпрацювання розроблених компонентів в умовах роботи на робочих тактових частотах.

Тестування засобів і складових системи вважається одним із найважливіших процесів у розробленні, оскільки під час тестування перевіряють відповідність системи вимогам користувача та заданим специфікаціям. Неправильний вибір методів та засобів тестування під час розроблення і відлагодження впливають на якість роботи системи і, як наслідок, на результати її функціонування у майбутньому. Тестування складових системи є одним із найтрудомісткіших процесів під час створення складних систем, до яких можна зарахувати і мобільні робототехнічні платформи (МРП). Тому розроблення і вдосконалення методів та засобів тестування спеціалізованих компонентів складних систем – актуальне і важливе завдання, вирішення якого у кінцевому результаті істотно впливає на майбутню їх експлуатацію.

Упровадження новітніх методів і засобів тестування спеціалізованих компонентів заощаджує час і витрати в довгостроковій перспективі експлуатації системи загалом завдяки виявленню та вирішенню проблем на ранніх стадіях розроблення.

*Об'єкт дослідження* – процеси розроблення сценаріїв тестування, вибору технологічних засобів тестування апаратно-програмних засобів спеціалізованих компонентів МРП на робочих тактових частотах.

*Предмет дослідження* – методи і засоби тестування апаратно-програмних засобів спеціалізованих компонентів МРП під час функціонування на робочих тактових частотах.

*Мета роботи* – вдосконалення методу тестування апаратно-програмних засобів спеціалізованих компонентів МРП на робочих тактових частотах із використанням еталонів.

Для досягнення поставленої мети визначено такі *основні завдання дослідження*:

- визначити етапи реалізації вдосконаленого методу тестування апаратно-програмних засобів спеціалізованих компонентів МРП на робочих тактових частотах з використанням еталона;
- вибрати набір спеціалізованого технологічного обладнання для тестування компонентів МРП на робочих тактових частотах;
- розробити базову структуру технологічного комплексу для тестування спеціалізованих компонентів МРП під час функціонування на робочих тактових частотах;
- розробити структуру засобів та сценаріїв тестування блоків шифрування/дешифрування даних і команд управління МРП;
- розробити структуру засобів та сценаріїв тестування системи нечіткого управління рухом МРП.

*Матеріали та методи дослідження.* У роботі використано методи попереднього опрацювання даних, сучасні методи та алгоритми побудови систем інтелектуального управління із використанням нечіткої логіки, методи криптографічного захисту передавання даних з використанням нейроподібних мереж; сучасні компоненти та елементну базу для реалізації апаратних та програмних компонентів, інтелектуального опрацювання із дачивів.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* Аналіз літератури [1], [2], [3], [4] показує, що питання тестування та налаштування складних систем, розроблення відповідних методів та засобів для його реалізації надзвичайно актуальні. Для налагодження та тестування складних систем використовують розглянутий у роботі [5] метод вимірювання складності програмного забезпечення для розподілу ресурсів у складній системі програмного забезпечення для тестування за принципом “сірої скриньки”. У [6] запропоновано метод для оцінювання покриття простору станів набору тестів із використанням t-wise тестування, комбінаторної техніки, запозиченої від спільноти тестувальників програмного забезпечення, яка узагальнює парне тестування. Автори [7] проаналізували роботу підводної комплексної системи, зважаючи на обмежувальні фактори, такі як невеликий обсяг вибірки даних, час і фінансові витрати.

Вони розглянули три схеми тестування перевірки експлуатаційної надійності та методи оцінювання підводної комплексної системи і навели принципи застосування різних схем. Стаття [8] зосереджена на проблемах отримання часових і функціональних даних у процесі моделювання складного цифрового пристрою та створення тестових шаблонів, придатних для виконання на цифровій тестовій системі. Розглянуто структуру моделі пристрою, подання інформації про синхронізацію та мову для визначення форм сигналу. На основі розроблення сутності інтегрованого випробування та діагностики, у [9] розглянуто складну систему судна як об'єкта дослідження, проаналізовано фактори, що впливають на інтегровану діагностику випробувань та запропоновано розширений метод аналізу. У [10] подано огляд лабораторних засобів моделювання в реальному часі, що забезпечують можливість тестувати комплексні системи і як інтегровані системи, і як набір окремих компонентів завдяки комбінації сумісних компонентів реального часу та змодельованих компонентів у реальному часі для системи моніторингу.

У статті [11] запропоновано метод тестування кіберфізичної системи промислового рівня та її автоматизації в різних обмежувальних умовах середовища. Розглянуто відомі методи тестування, наприклад тестування програмного забезпечення у циклі, тестування апаратного забезпечення в циклі, польове тестування. Але ці методи мають обмеження, пов'язані з високою вартістю, недостатнім тестуванням і важкою перевіркою, оскільки складність ситуації зростає. Системи, які працюють поблизу людини – дрони, автономні автомобілі, або ті, що використовуються в екстремальних умовах, мають бути перевірені в таких самих екстремальних середовищах, які розглянуто у вказаній статті. Тестування на основі моделі використання ланцюга Маркова (MCUM) описано у [12]. У статті введено поняття стимулів і реакцій, а також показано, що складні системи реального часу потребують методу тестування, який забезпечує можливість оброблення ефекту синхронізації та мінливості синхронізації вхідних даних системи. У [13] наведено програмний метод, який можна використовувати для перевірки цілісності апаратних зв'язків між тестером та інтерфейсом пристрою перед тестуванням будь-якого продукту, а порівнюючи отримані значення з відомими еталонними значеннями, можна передбачити, які канали сигналу в інтерфейсі пристрою працюватимуть некоректно. У статті [14] автори розглядають потік побудови тестового профілю апаратного та програмного забезпечення та їх інтеграції та пропонують удосконалений метод побудови комплексного профілю тестування надійності на основі комбінації апаратного/програмного забезпечення. Конфігурації тестового обладнання відповідно до різноманітних вимог тестування засобів БПЛА проаналізовано у [15] і на основі методу ієрархічного інтелектуального керування вирішено проблему автоматичної генерації процесу тестування, описано розроблене програмне забезпечення. Проектування цифрових засобів керування для силової електроніки та апаратне тестування в циклі розглянуто у статті [16]. Висвітлено впровадження та процедуру тестування віртуального випробувального стенда в реальному часі, на основі багатоплатформного середовища моделювання в реальному часі для керування силовою

електронікою із використанням узгоджувачів-пробників, що забезпечує зв'язок між апаратним і програмним забезпеченням. Проаналізовано систему керування простором станів підвищувального перетворювача зі зворотним зв'язком. У [17] запропоновано комплексний метод створення специфікацій комбінованого випробування апаратного та програмного забезпечення (HSCT) для промислових продуктів, що контролюються програмним забезпеченням за допомогою дослідження небезпеки та працездатності (HAZOP).

Сьогодні використовується все більше обладнання, яке поєднує програмне та апаратне забезпечення, і їхню надійність не можна перевірити окремо. У [18] описано профіль тестування апаратного забезпечення з використанням інформації про призначення системи та профіль середовища, а запропонований метод враховує як складність вхідних параметрів, так і вимоги реального часу під час створення тестових прикладів для спільного тестування надійності програмного та апаратного забезпечення.

Ефективним інструментом для оцінювання електричних систем і приводів є апаратне моделювання в режимі реального часу – hardware-in-the-loop (HIL), що все частіше використовують у промислових застосуваннях [19–22]. Протягом багатьох років було запропоновано багато систем реального часу для тестування обладнання в циклі (HIL). Однак, щоб бути практичною, платформа моделювання в реальному часі повинна бути недорогою та зручною для налаштування для різноманітних тестів. У цих статтях розглянуто віртуальні тестові стенди (VTB) і їх розширення у режимі реального часу (RTVTB) у поєднанні з індивідуальними апаратними інтерфейсами для реалізації доступної та універсальної платформи тестування в реальному часі для цифрових контролерів. Розглянуто також розроблене недороге, багаторазове рішення для середовища моделювання в реальному часі – віртуальний тестовий стенд у реальному часі (VTB-RT) на основі програмного забезпечення із відкритим вихідним кодом і готового обладнання. Зокрема, у статті [20] висвітлено застосування VTB-RT для тестування системи електроприводів із високими критичними часовими вимогами.

Отже, як показує аналіз, важливо враховувати, що методи налагодження можуть змінюватися залежно від типу складових системи та інструментів, які використовуються. Розроблення методів і засобів тестування та їх вдосконалення для налагодження спеціалізованих компонентів складних систем потребує подальших досліджень і сприятиме вирішенню проблем на ранніх стадіях процесу розроблення та визначатиме успішність подальшої експлуатації.

## Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

*Удосконалення методу тестування програмно-апаратних засобів спеціалізованих компонентів мобільної робототехнічної платформи на робочих тактових частотах.* Тестування апаратних та програмних засобів спеціалізованих компонентів мобільної робототехнічної платформи на робочих тактових частотах – важлива завершальна частина процесу розроблення. Таке тестування орієнтоване на перевірку функціональності, стабільності та продуктивності спеціалізованих

компонент у реальних умовах експлуатації. Тестування на робочих тактових частотах забезпечує виявлення можливих проблем із тепловим режимом роботи компонентів МРП у реальних умовах експлуатації. Для реалізації такого тестування зазвичай використовують спеціалізоване обладнання та технологічне програмне забезпечення.

Для тестування спеціалізованих компонент МРП на робочих тактових частотах запропоновано вдосконалений метод тестування спеціалізованих компонентів з використанням еталона для порівняння результатів роботи апаратно-програмних засобів тестованого компонента із очікуваним результатом. Наведемо основні етапи реалізації такого методу:

- розроблення функціональних і нефункціональних вимог до програмних та апаратних засобів спеціалізованих компонентів;
- розроблення плану тестування, який визначає стратегію, методи та ресурси, які необхідні для тестування програмно-апаратних засобів спеціалізованих компонентів;
- розроблення сценаріїв тестування засобів спеціалізованих компонентів, які описують послідовність кроків для перевірки різних функцій та можливостей спеціалізованого компонента, у яких для кожного сценарію визначено вхідні дані, послідовності сигналів управління, очікувані результати та критерії оцінювання отриманих результатів;
- тестування роботи на робочих тактових частотах, що передбачає налаштування подання тактових імпульсів з робочою частотою на входи спеціалізованих компонентів МРП і спеціалізованого технологічного обладнання;
- створення тестового середовища на базі технологічного обладнання;
- виконання тестів, що передбачає запуск спеціалізованого програмного забезпечення на апаратних засобах на робочій тактовій частоті й виконання тестових сценаріїв;
- виконання тестових сценаріїв із генерацією вхідних даних, послідовностей сигналів управління та реєстрацією результатів тестування;
- порівняння результатів тестування з еталонними результатами та їх оцінювання: результати збігаються – спеціалізований компонент працює правильно, результати відрізняються – є потенційні проблеми або помилки, які потрібно виправити;
- аналіз результатів порівняння, який зводиться до встановлення причини того, що результати не збігаються з еталоном, та прийняття рішення про виправлення функціонування засобів спеціалізованого компонента системи.

*Вибір спеціалізованого технологічного обладнання для тестування спеціалізованих компонентів МРП на робочих тактових частотах.* Для забезпечення тестування засобів спеціалізованих компонентів МРП на робочих тактових частотах вибираємо спеціалізовані технологічні засоби, які складаються з трьох груп. До першої групи належать такі пристрої:



- генератор вхідної імітаційної послідовності даних і команд із програмованою розрядністю слів, довжиною масиву, частотою видавання даних і команд, довжиною пауз між масивами та можливістю зациклення;
- накопичувач-аналізатор результатів обчислення із програмованою розрядністю, ємністю та частотою приймання;
- генератор керуючих періодичних і неперіодичних сигналів з програмованим періодом між імпульсами, довжиною імпульсу та можливістю зациклення;
- системного таймера, що працює із заданою частотою і точністю в заданому інтервалі часу;
- трасування, що забезпечує запам'ятовування інформації задану кількість тактів.

У другу групу входять бібліотеки програм, що реалізують стандартні алгоритми віддаленого керування, навігації, переміщення та підтримки роботи корисного навантаження, драйвери для обслуговування взаємодії управляючого комп'ютера з навігаційними давачами, виконавчими механізмами та прийомо-передавачами.

До складу третьої групи входять пакети програмних засобів для проектування спеціалізованих НВІС, які використовують для реалізації часомістких операцій алгоритмів шифрування та дешифрування. Проектування спеціалізованої НВІС – складний процес, який охоплює етапи алгоритмічного, архітектурного, логічного, схемного та топологічного проектування. В міру ускладнення спеціалізованих НВІС більше уваги звертають на алгоритмічний рівень проектування. Під час проектування спеціалізованих НВІС на програмованих логічних інтегральних схемах використовують інтегровані середовища розробки, наприклад, фірми ALTERA MAX+plus II, який реалізує всі етапи проектування від редактора вхідного VHDL опису проекту до програмування кристала, що складається із таких основних програмних компонентів:

- графічних редакторів розроблення електричних принципівих схем і розроблення проектів

у вигляді часових діаграм та текстового редактора написання тексту програм проекту на мовах AHDL, VHDL, Verilog;

- компілятора вхідних даних на внутрішню машинну мову;
- симулятора часових діаграм для побудови вихідних часових співвідношень за заданих вхідних;
- підтримки пристроїв програмування;
- сервісних функцій, бібліотеки базових цифрових пристроїв та аналізаторів затримок і помилок.

Для тестування спеціалізованих компонентів МРП розроблено базову структуру технологічного комплексу, наведену на рис. 1, де ПК – персональний комп'ютер, АІ – адаптер інтерфейсів; Тм – таймер; ГД – генератор даних; ГКС – генератор керуючих сигналів; ТР – трасувальник; НР – накопичувач результатів; СКМРП – спеціалізована компонента МРП, МУ – модуль управління процесом налагодження.

Для тестування спеціалізованих компонентів на робочих тактових частотах необхідно забезпечити відповідну інтенсивність надходження вхідних даних і приймання результатів обчислень. Під час налаштування технологічні засоби повинні забезпечувати пуск і зупинку роботи в задані моменти часу та запис стану шин апаратних засобів. Процес налагодження спеціалізованих апаратно-програмних засобів реального часу можна розділити на такі етапи:

- підготовка тестових масивів даних і формування масиву керуючих сигналів відповідно до режимів роботи;
- підготовка апаратури технологічного інструментального комплексу (завантаження тестових масивів даних і їх перевірка);
- проведення експерименту;
- накопичення результатів експериментів та їх опрацювання.

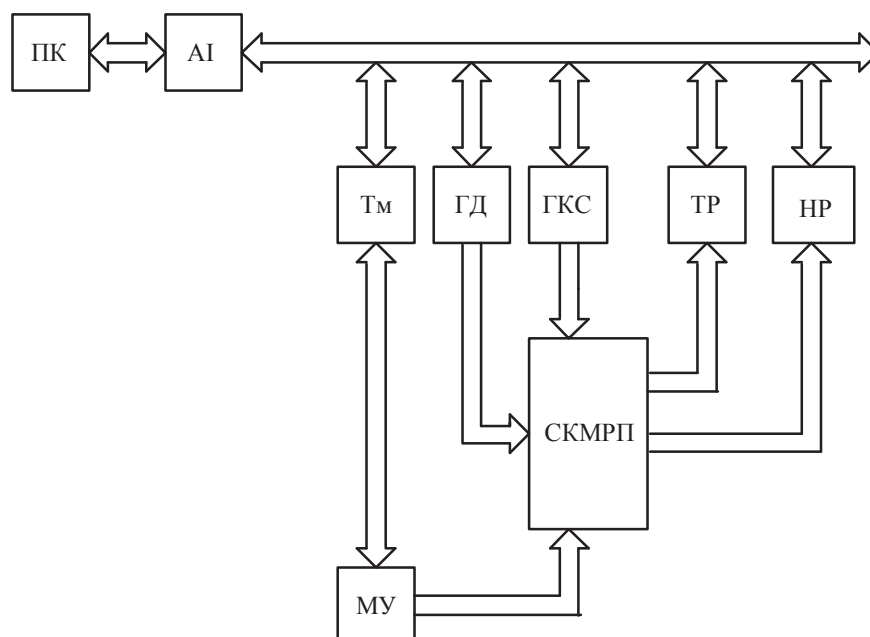


Рис. 1. Базова структура технологічного комплексу для тестування спеціалізованих компонентів / The basic structure of the technological complex for testing specialized components

В основу побудови технологічного комплексу для тестування покладено принцип магістрально-модульної організації, який передбачає створення комплексу із набору модулів. Під апаратним модулем розуміють конструктивно і функціонально завершений пристрій, що дає змогу самостійно або у сукупності з іншими модулями розв'язувати поставлені задачі.

Задачу розроблення апаратної частини технологічного комплексу розглядатимемо як задачу вибору набору модулів, а також вирішення питань зв'язку між модулями і спеціалізованими апаратно-програмними засобами реального часу. Формування апаратної конфігурації технологічного комплексу для тестування конкретних програмно-апаратних засобів спеціалізованих компонент МРПІ на робочих тактових частотах здійснюється за допомогою вибору необхідного набору модулів.

Склад модулів технологічного комплексу повинен забезпечувати виконання таких функцій:

- задання режимів роботи процесорів і системи;
- підготовки та налаштування програмного забезпечення;
- завантаження та перезавантаження інформації з програмної пам'яті процесорів на зовнішні запам'ятовувальні пристрої;
- перегляд і модифікацію інформації, записаної у пам'яті процесорів;
- перегляд і модифікацію інформації внутрішнього ОЗП і регістрів процесорів;
- запуск та зупинку роботи процесорів і системи;
- продовження виконання робочої програми процесорів і системи;
- встановлення та відміну зупинки за заданою адресою;

- генерацію вхідних масивів даних і керуючих сигналів;
- накопичення і перегляд інформації про стан шин системи;
- накопичення і збереження результатів оброблення на зовнішні запам'ятовувальні пристрої;
- порівняння вихідних результатів із еталонними;
- визначення часу виконання заданих ділянок програми.

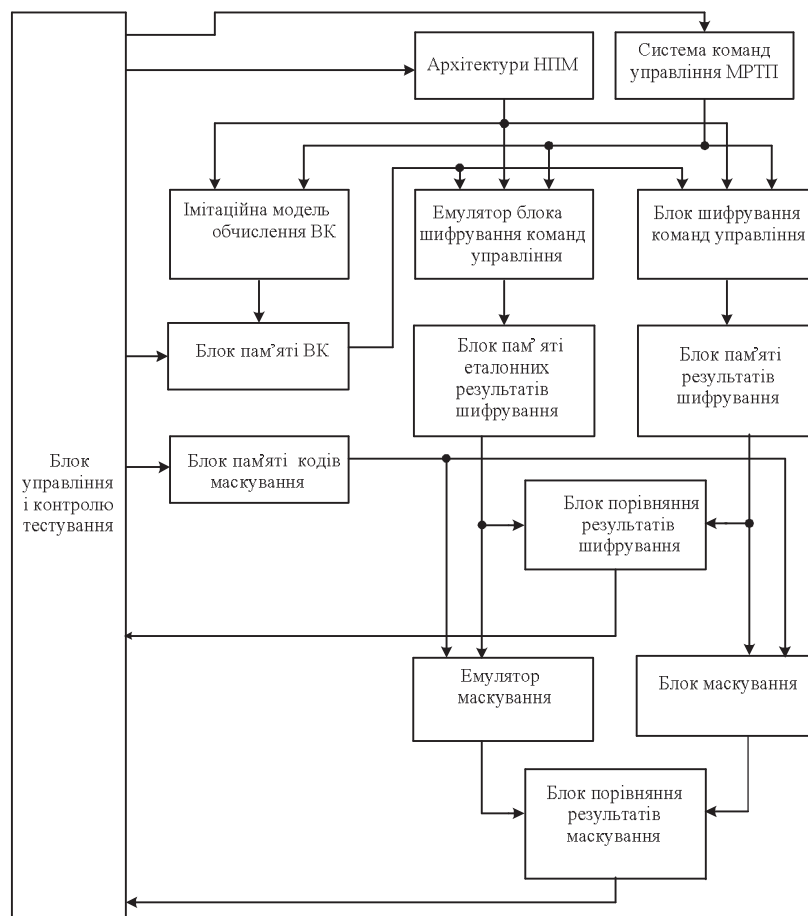
Забезпечити виконання перерахованих функцій можуть такі апаратні модулі:

- генератори вхідної імітаційної послідовності даних, команд і керуючих сигналів.
- накопичувачі результатів обчислення та стану шин системи (трасувальник);
- системний таймер;
- внутрішньосхемні емулятори мікропроцесорів.

*Розроблення структур та сценаріїв для тестування спеціалізованих компонент МРПІ на робочих тактових частотах.* Розглянемо тестування засобів нейроподібного криптографічного захисту даних та команд управління МРПІ. Для тестування вказаних засобів розроблено два середовища та два сценарії тестування:

- перший – тестування засобів шифрування та маскування команд управління МРПІ;
- другий – тестування засобів демаскування і дешифрування команд управління МРПІ.

Для тестування блоків нейроподібного шифрування та маскування даних та команд управління МРПІ розроблено структуру засобів, наведену на рис. 2, де НІМ – нейроподібна мережа, ВК – вагові коефіцієнти.



**Рис. 2.** Структура засобів для тестування блоків нейроподібного шифрування та маскування даних і команд управління / Structure of tools for testing blocks of neuro-like encryption and masking of data and control commands

Особливістю розробленої структури засобів (рис. 2) є одночасне тестування апаратного та програмного забезпечення блока нейроподібного шифрування та маскування команд управління МРП. У структуру засобів для тестування входять емулятори блока шифрування та маскування, які можуть бути реалізовані у вигляді програмних модулів, що відтворюють операції шифрування та маскування на комп'ютері, або спеціалізованих пристроїв. Емулятори шифрування та маскування забезпечують підготовку еталонних результатів шифрування та маскування.

Основні етапи тестування блоків шифрування та маскування такі:

- вибір архітектури нейроподібної мережі;
- обчислення вагових коефіцієнтів для вибраної архітектури нейроподібної мережі та запис у їх пам'ять результатів;
- запис масок у блок пам'яті;
- підготовка за допомогою емулятора еталонних результатів шифрування команд управління МРП та запис їх у блок пам'яті;
- шифрування блоком команд управління МРП та запис результатів у пам'ять;
- порівняння результатів шифрування, отриманих блоком шифрування, з еталонними результатами;
- формування висновку на підставі порівняння результатів шифрування;
- маскування результатів, отриманих з блока шифрування, та еталонних;

- порівняння результатів маскування та формування висновку.

Для тестування блоків нейроподібного дешифрування та демаскування розроблено структуру засобів, наведену на рис. 3.

Основні етапи тестування блоків дешифрування та демаскування такі:

- запис кодів демаскування у блок пам'яті;
- демаскування емулятором команди управління і запис результатів у блок пам'яті;
- демаскування блоком команди управління і запис результатів у блок пам'яті;
- порівняння результатів демаскування – еталонних із отриманими;
- аналіз результатів порівняння демаскування та формування висновку;
- обчислення ВК для дешифрування команди управління МРП із використанням імітаційної моделі та їх запис у блок пам'яті;
- дешифрування команди управління МРП за допомогою емулятора та розробленого блока і запис отриманих команд у відповідні блоки пам'яті;
- порівняння еталонних команд управління з отриманими за допомогою розробленого блока дешифрування;
- аналіз результатів порівняння команд управління і формування висновку.

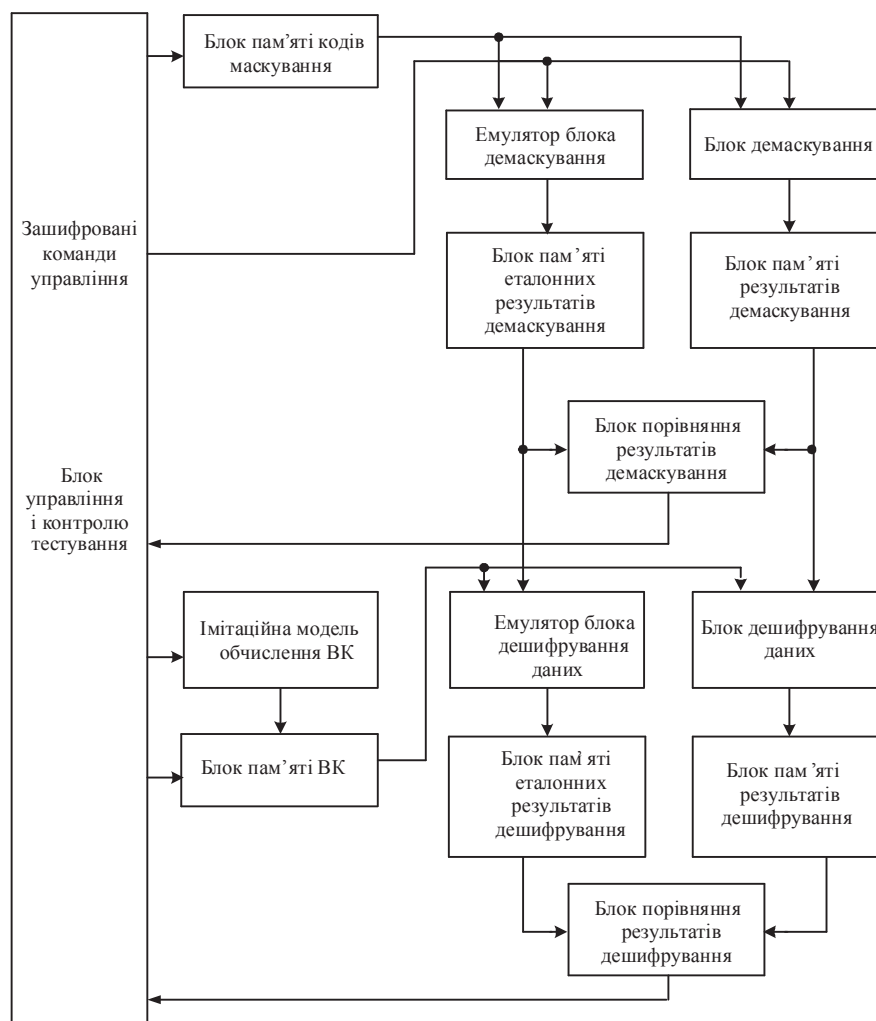


Рис. 3. Структура засобів для тестування блоків нейроподібного дешифрування та демаскування даних і команд управління МРП / Structure of tools for testing blocks of neuro-like decryption and data unmasking and MRP control commands

**Тестування системи нечіткого управління рухом МРП.** Для автономного управління рухом колісної МРП розроблено систему нейронечіткого управління, основними компонентами якої є інтелектуальні навігаційні давачі віддалі, база правил, блоки фазифікації, прийняття рішень і дефазифікації. Зміна швидкості та траєкторії руху МРП здійснюється на основі інформації, що надходить із бортових інтелектуальних навігаційних давачів. Дані з бортових інтелектуальних навігаційних датчиків надходять на вхід блока фазифікації, де перетворюються на нечіткі змінні. Таке перетворення здійснюється за рахунок зіставлення конкретного значення вхідної величини та значення функції належності відповідного терму вхідної лінгвістичної змінної. Особливість етапу фазифікації полягає у формуванні функцій належності та визначенні кількості термів лінгвістичної змінної.

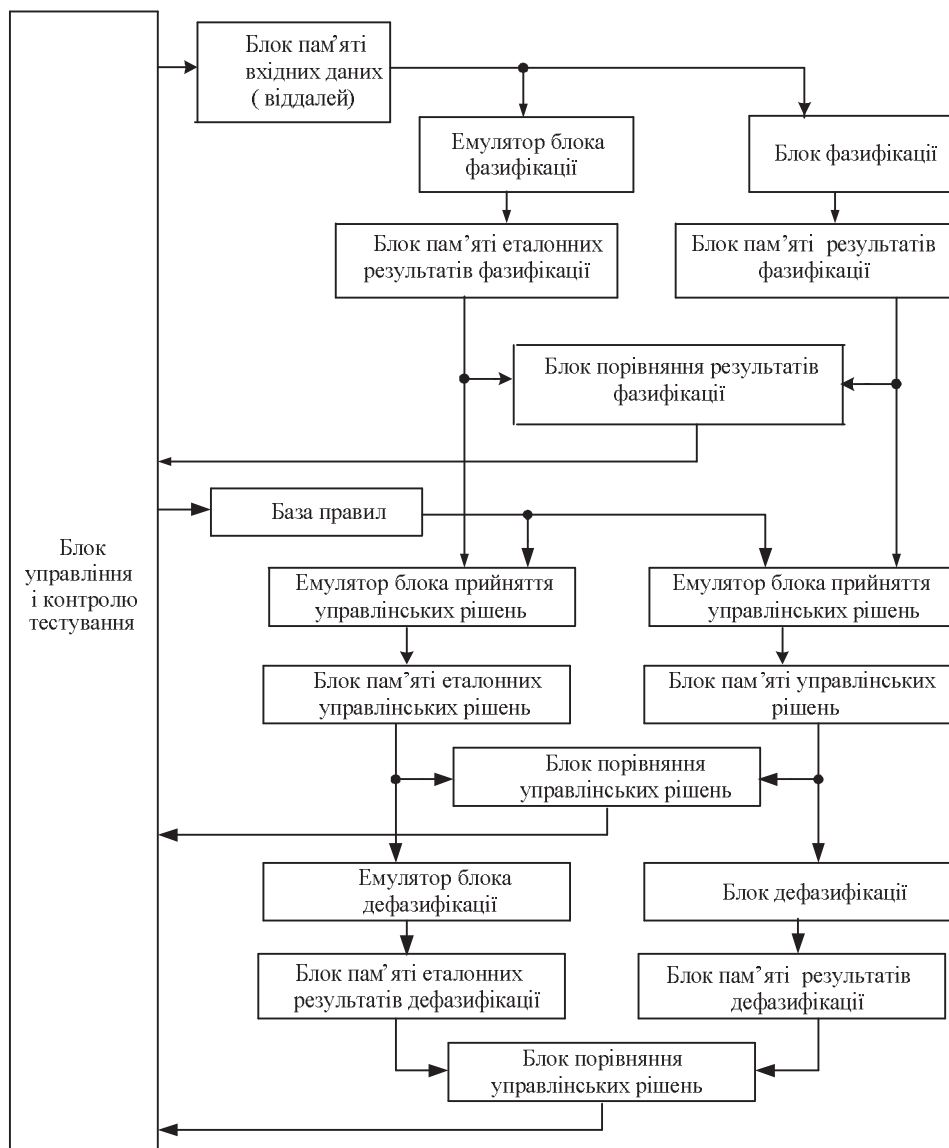
Робота блока прийняття управлінських рішень ґрунтується на нечітких правилах, які повинні адекватно відображати мету та охоплювати всі можливі випадки управління рухом МРП. Під час приймання управлінських рішень виконується перетворення вхідної нечіткої

множини на вихідну нечітку множину із використанням нечіткої бази. Блок дефазифікації виконує перетворення нечітких вихідних значень на чіткі величини, які подають на приводи колісної системи руху МРП.

Для тестування системи нечіткого управління рухом МРП на робочих тактових частотах розроблено структуру засобів, наведену на рис. 3.

Основні етапи тестування системи нечіткого управління рухом МРП такі:

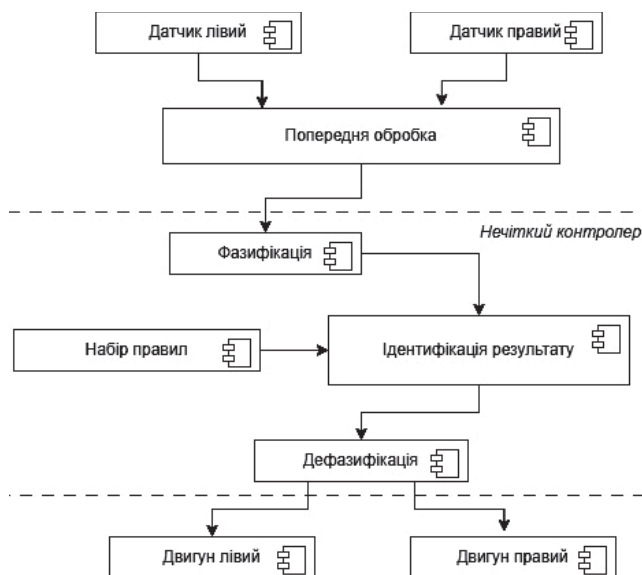
- запис вхідних даних (віддалей) у блок пам'яті;
- фазифікація емулятором вхідних даних і запис результатів у блок пам'яті еталонних результатів;
- фазифікація блоком вхідних даних і запис результатів у блок пам'яті результатів фазифікації;
- порівняння еталонних результатів фазифікації з отриманими блоком фазифікації;
- аналіз результатів порівняння фазифікації та формування висновку;
- підготовка бази правил;



**Рис. 4.** Структура засобів для тестування системи нечіткого управління рухом МРП / The structure of means for testing the system of fuzzy control for the MRP

- генерування емулятором та блоком прийняття управлінських рішень відповідних управлінських рішень та запис їх у відповідні блоки пам'яті;
- порівняння еталонних управлінських рішень з отриманими за допомогою розробленого блока прийняття управлінських рішень;
- аналіз результатів порівняння управлінських рішень і формування висновку;
- дефазифікація емулятором управлінських рішень і запис результатів у блок пам'яті еталонних результатів;
- дефазифікація блоком управлінських рішень і запис результатів у блок пам'яті результатів дефазифікації;
- порівняння еталонних результатів дефазифікації із отриманими блоком дефазифікації;
- аналіз результатів порівняння результатів дефазифікації та формування висновку.

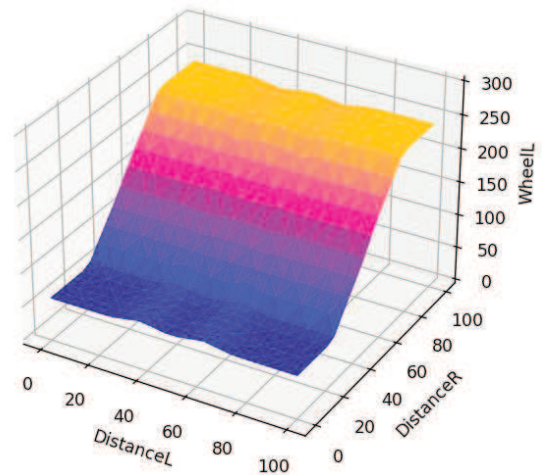
**Використання розробленого методу тестування спеціалізованих компонентів МРП.** Розроблений метод використано для тестування створеного нечіткого контролера для системи керування рухом МРП, яка використовувала нечіткий висновок Мамдані. Головний функціонал системи керування МРП розділено на спеціалізовані компоненти, що реалізують функцію зчитування даних із датчиків, функцію підготовки даних, запуску нечіткого контролера та функцію керування двигунами. Загалом система забезпечує здатність МРП уникати перешкод під час навігації між двома пунктами. Контролер відповідає за збереження безпечної віддалі роботи до перешкоди, одночасно уникаючи різких змін траєкторії руху та швидкості.



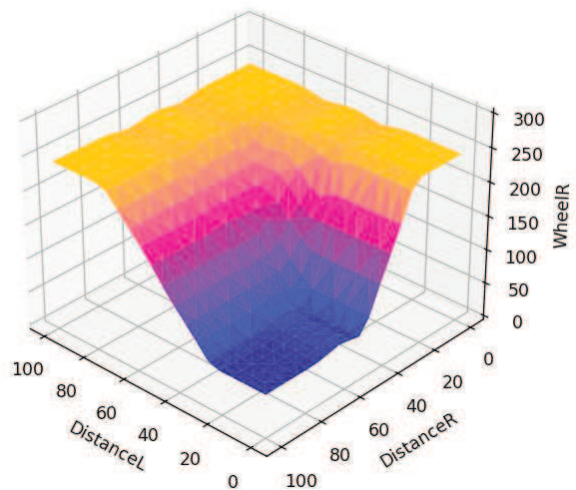
**Рис. 5.** Структура компонентів системи керування МРП / The structure of the components of the MRP control system

Налагодження та тестування спеціалізованих компонентів виконано зі створенням еталонів під час моделювання руху МРП за допомогою програмного пакета Simful для Python. Їх застосовано для моделювання "type-1 fuzzy logic systems". Створення еталонів виконано для випадку МРП, що має два датчики віддалі, які використовуються для детектування перешкод у на-

прямку руху. У системі моделювання Simful визначено нечіткі правила логічного висновку, вхідні та вихідні лінгвістичні змінні. Після цього у циклі виконано розрахунок еталона поверхні відгуку системи керування МРП із заданням вхідних чітких змінних у всьому діапазоні допустимих значень та розрахунком вихідного значення для керування двигунами МРП. Для отримання еталонів сигналів керування лівого та правого двигунів виконано окремі експерименти. Для побудови поверхні відгуку в системі Simful у циклі задано значення вхідних чітких змінних у діапазоні допустимих значень та розраховано значення вихідної дефазифікованої змінної. Отримані еталони поверхні відгуку нечіткої системи керування МРП подано на рис. 6 для лівого двигуна та на рис. 7 – для правого.



**Рис. 6.** Еталонна поверхня відгуку системи керування для лівого двигуна МРП / Reference response surface of the control system for the left MRP engine



**Рис. 7.** Еталонна поверхня відгуку системи керування для правого двигуна МРП / Reference response surface of the control system for the right MRP engine

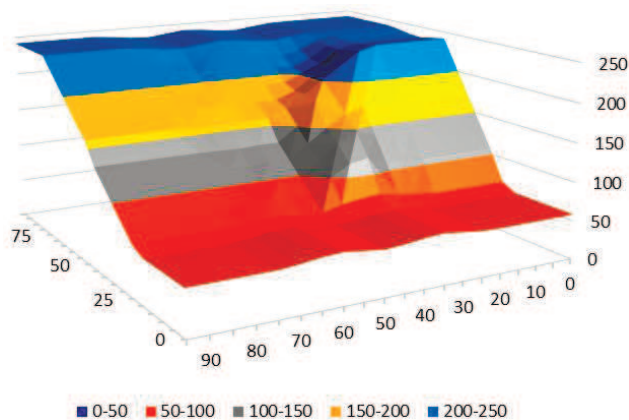
Поверхня відгуку показує всі можливі вихідні значення для повного діапазону зміни вхідних змінних, а відмінність у формі поверхонь зумовлена необхідністю уникнення перешкоди під час руху МРП на близькій віддалі (повернути вліво від перешкоди).

Для реалізації процесу тестування спеціалізованих компонентів МРП виконано порівняння результатів функціонування розроблених апаратно-програмних за-

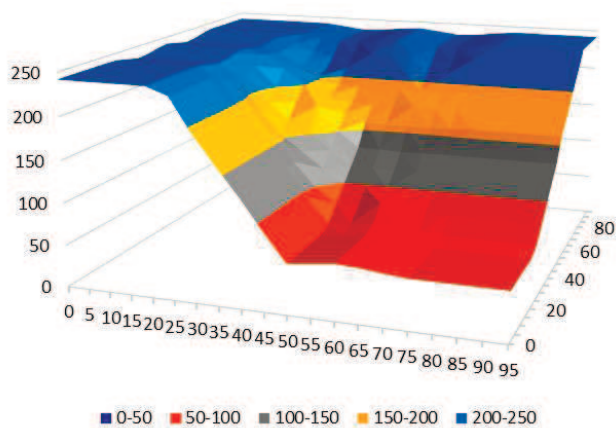


собів нечіткої системи керування з попередньо отриманими еталонними значеннями. Еталонна поверхня відгуку змодельованого нечіткого контролера у Simrful повинна збігатись із поверхнею, отриманою під час тестування розроблених апаратно-програмних компонентів.

Засоби нечіткої системи керування для МРП розроблено на основі апаратної платформи на базі мікроконтролера ESP-32 фірми Espressif з робочою тактовою частотою 160 МГц та з використанням програмного забезпечення на основі бібліотеки eFLL. Під час тестування за допомогою емуляторів датчиків віддали на вхід розробленого нечіткого контролера системи керування МРП подавали значення змінних у діапазоні регулювання системи, а з його виходу знімали відповідні сигнали керування двигунами. На основі отриманих тестових даних сформовано поверхні відгуку сигналів керування для лівого (рис. 8) та правого (рис. 9) коліс МРП.



**Рис. 8.** Відображення тестової поверхні відгуку нечіткого контролера системи керування МРП для лівого двигуна / Test surface response of the fuzzy controller of the MRP control system for the left engine



**Рис. 9.** Відображення тестової поверхні відгуку нечіткого контролера системи керування МРП для правого двигуна / Test surface response of the fuzzy controller of the MRP control system for the right engine

Відповідно до запропонованої методики та вибраних засобів тестування спеціалізованих компонентів МРП на робочих тактових частотах отримано збіг даних тестування з еталонними даними, що дає змогу стверджувати про коректність функціонування компонентів розробленої системи керування МРП з використанням нечіткої логіки і доцільність застосування за-

пропонованої методики для виконання тестування складних систем.

**Обговорення результатів дослідження.** Сьогодні МРП створюють із використанням спеціалізованих компонентів для реалізації окремих завдань. Без належного тестування програмних та апаратних компонентів роботизована платформа може функціонувати зі збоями. Наприклад, некоректне передавання даних між мікроконтролерними компонентами та системою керування може спричинити неправильне прийняття рішень системою у комплексі, що призведе до неправильного її функціонування. Отже, відсутність комплексного тестування може призвести до небажаних і непередбачуваних наслідків.

Створення і подальше налагодження компонентів потребує уважного ставлення до їх тестування та налаштування у складі МРП у комплексі. Відпрацьовувати розроблені компоненти потрібно на робочих тактових частотах. Неправильний вибір методів та засобів під час тестування впливає на якість оцінки роботи системи і на її функціонування у майбутньому. Тестування складових системи – один із найскладніших процесів, а отже, розроблення і вдосконалення методів та засобів для його забезпечення істотно впливає на майбутню експлуатацію МРП.

Упровадження новітніх методів і засобів тестування спеціалізованих компонентів складних систем заощаджує час і фінансові затрати та сприяє у перспективі тривалій експлуатації систем загалом завдяки виявленню проблем під час їх створення.

Запропоновано вдосконалений метод тестування апаратно-програмних засобів спеціалізованих компонентів МРП на робочих тактових частотах із використанням еталонів. З його використанням розроблено структури та сценарії для тестування засобів нейроподібного криптографічного захисту даних і команд управління та для тестування системи нечіткого управління рухом МРП. Розроблений метод використано для тестування створеного нечіткого контролера для системи керування рухом МРП, що підтвердило правильність запропонованих принципів.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – вперше розроблено структуру засобів та сценаріїв тестування блоків нейроподібного шифрування/дешифрування та маскування/демаскування команд управління МРП, які забезпечують спільне тестування як програмних, так і апаратних засобів на робочих тактових частотах у режимі реального часу.

*Практична значущість результатів дослідження* – розроблений метод тестування апаратно-програмних засобів спеціалізованих компонентів МРП на робочих тактових частотах можна використати під час тестуванні нечіткого контролера для системи керування рухом МРП у режимі реального часу. Це, своєю чергою, в перспективі сприятиме тривалій експлуатації різних систем завдяки виявленню проблем під час їх створення.

## Висновок / Conclusions

У статті проаналізовано процеси розроблення сценаріїв тестування, вибору технологічних засобів тестування апаратного та програмного забезпечення спеціалізованих компонентів МРП на робочих тактових частотах. Досліджено методи і засоби тестування спеціалі-

зованих компонентів МРП під час функціонування на робочих тактових частотах.

Удосконалено метод тестування апаратно-програмних засобів спеціалізованих компонентів МРП з використанням еталона, який за рахунок розроблення спеціалізованих сценаріїв і адаптації технологічного середовища до вимог конкретного застосування забезпечує поліпшення якості тестування у режимі реального часу. Показано, що основними етапами тестування спеціалізованого забезпечення на робочих тактових частотах є: розроблення плану тестування, встановлення робочої тактової частоти, створення тестового середовища, виконання тестів, порівняння результатів тестування з еталонними результатами, аналіз результатів порівняння.

Розроблено структуру засобів та сценаріїв тестування блоків нейроподібного шифрування/дешифрування та маскувannya/демаскування команд управління МРП, які забезпечують спільне тестування як програмних, так і апаратних засобів на робочих тактових частотах. Розроблено структуру засобів та сценаріїв тестування системи нечіткого управління рухом МРП, які орієнтовані на послідовне тестування блоків фазифікації, прийняття рішень і дефазифікацію та забезпечують спільне тестування як програмних, так і апаратних засобів на робочих тактових частотах у реальному часі. З використанням вдосконаленого методу виконано тестування системи керування МРП, що підтвердило доцільність вибраного підходу.

## References

- [1] Lee, K.-J., Chang, C.-Y., Su, A. & Liang, S.-Y. (2009). A unified test and debug platform for SOC design, IEEE 8th International Conference on ASIC, China, 577–580. <https://doi.org/10.1109/ASICON.2009.5351351>
- [2] Farchi, E., Kliot, G., Krasny, Y., Krits, A. & Vitenberg, R. (2005). Effective testing and debugging techniques for a group communication system, International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN'05), Japan, 80–85. <https://doi.org/10.1109/DSN.2005.41>
- [3] Peterson, K. & Savaria, Y. (2004). Assertion-based on-line verification and debug environment for complex hardware systems. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (IEEE Cat. No.04CH37512), Canada, II–685. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2004.1329364>
- [4] Shen, S., Qin, Y. & Li, S. (2004). Debugging complex counterexample of hardware system using control flow distance metrics. 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2004. MWSCAS '04., Japan, 1–501. <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2004.1354037>
- [5] Meng, L., Lu, M., Huang, B. & Xu, X. (2011). Using relative complexity measurement which from complex network method to allocate resources in complex software system's gray-box testing. International Symposium on Computer Science and Society, Kota Kinabalu, Malaysia, 189–192. <https://doi.org/10.1109/ISCCS.2011.59>
- [6] Maximoff, J.R., Kuhn, D.R., Trela, M.D. & Kacker, R. (2010). A method for analyzing system state-space coverage within a t-wise testing framework. IEEE International Systems Conference, San Diego, USA, 598–603. <https://doi.org/10.1109/SYSTEMS.2010.5482481>
- [7] Wang, D.-H., Li, J., Liu, X.-X. & Lu, J.-I. (2021). Discussion on operational reliability test scheme and evaluation method of underwater complex system. 2021 2nd international conference on electronics, Communications and Information Technology (CECIT), China, 508–512. <https://doi.org/10.1109/CECIT53797.2021.00096>
- [8] Taylor, T. (1993). Tools and techniques for converting simulation models into test patterns. Proceedings of IEEE International Test Conference, USA, 133–138. <https://doi.org/10.1109/TEST.1993.470709>
- [9] Li, F., Liu, B., Peng, D. & Tang, L. (2017). An extendibility analysis method research for integrated test diagnosis on ship complex system. International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA), China, 179. <https://doi.org/10.1109/DOSA.2017.44>
- [10] Ponci, F., Sadu, A., Uhl, R., Mirz, M., Angioni, A. & Monti, A. (2018). Instrumentation and measurement testing in the real-time lab for automation of complex power systems. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 21 (1), 17–24. <https://doi.org/10.1109/MIM.2018.8278805>
- [11] Kim, J., Chon, S. & Park, J. (2019). Suggestion of testing method for industrial level cyber-physical system in complex environment. IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops, China, 148–152. <https://doi.org/10.1109/ICSTW.2019.00043>
- [12] Siegl, S., Hielscher, K.-S. & German, R. (2010). Introduction of time dependencies in usage model based testing of complex systems. IEEE International Systems Conference, San Diego, USA, 622–627. <https://doi.org/10.1109/SYSTEMS.2010.5482341>
- [13] Peterson, G. (2002). Verification of device interface hardware interconnections prior to the start of testing. International Test Conference, USA, 297–300. <https://doi.org/10.1109/TEST.2002.1041772>
- [14] Ai, J., Zhong, F. & Wang, J. (2012). A method of constructing comprehensive reliability testing profile based on hardware and software. International conference on quality, reliability, risk, maintenance, and safety engineering, China, 879–884. <https://doi.org/10.1109/ICQR2MSE.2012.6246367>
- [15] Yongke, L. & Yongqing, B. (2007). Synthesis automatic test system that realizes based on configuration test technology. 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, China, 955–958. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2007.4350614>
- [16] Lu, B., Monti, A. & Dougal, R. (2003) Real-time hardware-in-the-loop testing during design of power electronics controls. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, USA, 1840–1845. <https://doi.org/10.1109/IECON.2003.1280340>
- [17] Takahashi, M., Ueno, K., Anang, Y. & Watanabe, Y. (2021) A comprehensive creation method of hardware and software combined test specifications for industrial product controlled by software using HAZOP. 60th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Japan, 444–449.
- [18] Hou, C., Wang, Q. & Ren, Z. (2011). One test case generation method for SW&HW reliability co-testing. The Proceedings of 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, China, 742–745. <https://doi.org/10.1109/ICRMS.2011.5979362>
- [19] Figueroa, H.P., Monti, A. & Wu, X. (2004). An interface for switching signals and a new real-time testing platform for accurate hardware-in-the-loop simulation. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, France, 883–887. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2004.1571930>
- [20] Lu, B., Wu, X. & Monti, A. (2005). Implementation of a low-cost real-time virtue test bed for hardware-in-the-loop testing. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, USA. <https://doi.org/10.1109/IECON.2005.1568910>
- [21] Putri, T.W., Ginting, M.F., Trilaksono, B.R., Hidayat, E.M. & Sagala, M.F. (2017). Hardware in the loop simulation development of guidance system for autonomous underwater glider. 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), Malaysia, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICEEI.2017.8312388>
- [22] Belanger, N., Favarcq, N. & Fusero, Y. (2009). An open real time test system approach. First International Conference on Advances in System Testing and Validation Lifecycle, Portugal, 38–41. <https://doi.org/10.1109/VALID.2009.14>

## METHOD AND MEANS OF TESTING SPECIALIZED COMPONENTS OF A MOBILE ROBOTICS PLATFORM AT OPERATING CLOCK FREQUENCIES

Processes of development of test scenarios, selection of technological means of testing hardware and software of specialized components of mobile robotic platform are analyzed. The methods and means of testing specialized components of the mobile robotic platform when operating at working clock frequencies are studied. It is improved the method of testing the hardware and software of the specialized components of the mobile robotics platform. This improvement is made due to the development of specialized scenarios and adaptation of the technological environment to the requirements of a specific application, ensures an increase in the quality of testing in real time. It is shown that the main stages of testing specialized hardware at working clock frequencies are: the development of a test plan, setting of a working clock frequency, creation of a test environment, execution of tests, comparison of test results with reference results, analysis of comparison results. For testing, two environments and two test scenarios are developed: testing of means of encryption and masking of control commands of the mobile robotics platform; testing means of unmasking and deciphering control commands of a mobile robotics platform. It is developed a neurofuzzy control system for the autonomous control of the movement of a wheeled mobile robotic platform, the main components of which are intelligent remote navigation sensors, a rule base, fuzzification, decision-making and defuzzification blocks. The structure of means and scenarios for testing blocks of neuro-like encryption/decryption and masking/unmasking of mobile robotic platform control commands are developed, which provide joint testing of both software and hardware at working clock frequencies. It is developed the structure of tools and scenarios for testing the fuzzy mobile robotic platform control system, which are focused on sequential testing of fuzzification, decision-making, and defuzzification blocks and provide joint testing of both software and hardware tools at working clock frequencies in real time. Using the improved method, testing of the mobile robotic platform control system is performed, which confirmed the feasibility of the chosen approach. The implementation of the latest methods and means of testing specialized components of complex systems saves time and financial costs and contributes to the long-term operation of systems as a whole as a result of identifying problems in the process of their creation.

**Keywords:** hardware and software testing; mobile platform; specialized system components; structure of system testing tools.

---

### Інформація про авторів:

**Цмоць Іван Григорович**, д-р техн. наук, професор, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: ivan.tsmots@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4033-8618>

**Опотяк Юрій Володимирович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: yurii.v.opotyak@lpnu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9889-4177>

**Сенета Мар'яна Ярославівна**, канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: mariana.y.seneta@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-1249-0935>

**Олійник Юрій Юрійович**, аспірант, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: yurii.y.oliiynyk@lpnu.ua

**Газда Назар Богданович**, аспірант, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: nazar.b.hazda@lpnu.ua; <https://orcid.org/0009-0003-9323-9781>

**Ткачук Катерина Ігорівна**, асистент, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: katelyna.i.tkachuk@lpnu.ua; <https://orcid.org/0009-0002-1788-8715>

**Цитування за ДСТУ:** Цмоць І. Г., Опотяк Ю. В., Сенета М. Я., Олійник Ю. Ю., Газда Н. Б., Ткачук К. І. Метод та засоби тестування спеціалізованих компонентів мобільної робототехнічної платформи на робочих тактових частотах. *Український журнал інформаційних технологій*. 2023. Т. 5, № 2. С. 49–59.

**Citation APA:** Tsmots, I. G., Opotyak, Yu. V., Seneta, M. Ya., Oliynyk, Yu. Yu., Gazda, N. B., & Tkachuk, K. I. (2023). Method and means of testing specialized components of a mobile robotics platform at operating clock frequencies. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 5(2), 49–59. <https://doi.org/10.23939/ujit2023.02.049>