

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

ГЕРАСИМЕНКО КОСТЯНТИН ЄВГЕНОВИЧ

УДК 658:512.011:681.326:519.713

МЕТОДИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ТЕСТУВАННЯ
КРИТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Харківському національному університеті радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Хаханов Володимир Іванович, Харківський національний університет радіоелектроніки, декан факультету комп'ютерної інженерії та управління.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Краснобасв Віктор Анатолійович, Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії;

доктор технічних наук, професор
Хажмурадов Манап Ахмадович, Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут", начальник відділу математичного моделювання та дослідження ядерно-фізичних процесів і систем.

Захист відбудеться "26" червня 2013 року о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.01 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий "21" травня 2013 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Литвинова Є.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Досвід експлуатації систем захисту в різних галузях економіки показав системні залежності, які необхідно враховувати при використанні нових мікропроцесорних засобів і програмного забезпечення для розв'язання задач автоматичного захисту й регулювання технологічних процесів і обладнання. Однією з таких залежностей є можливість використання якісно нових методів безперервного контролю (функціонального тестування), що забезпечують перевірку справності обладнання без втрати його працездатності при виконанні тестів. Розвиток зазначених методів є актуальним у зв'язку з тим, що постійно підвищуються вимоги нормативних документів до характеристик функціональної надійності, засобів захисту від поодиноких несправностей та їх комбінацій, а також до захисту від помилок персоналу при експлуатації та технічному обслуговуванні устаткування систем керування критичними об'єктами.

Одним з критичних об'єктів є атомна електростанція, де від якості та надійності системи керування енергоблоками залежить економіка країни, життя і здоров'я людей, а також екологія планети. При цьому існує актуальна задача тестування та перевірки працездатності системи керування в реальному часі. У дисертаційній роботі пропонуються моделі та методи функціонального тестування цифрової апаратури критичних систем керування, які дають змогу здійснювати моніторинг справної поведінки всіх компонентів з наперед заданим періодом сканування від декількох секунд до однієї хвилини.

Сучасний рівень розвитку розвитку інформаційно-керуючих систем атомних електростанцій (АЕС) в Україні та в світі характеризується впровадженням обладнання, побудованого на базі сучасних цифрових технологій. Таке обладнання, як правило, являє собою функціонально орієнтований комплекс технічних і програмних засобів, до складу якого входять: обладнання керуючих систем нормальної експлуатації (система контролю й керування) – забезпечує підтримку номінальних (нормальних) проектних характеристик і умов експлуатації енергоблоку АЕС; обладнання керуючих систем безпеки (КСБ) – використовується для локалізації проектних аварій з метою запобігти їх переходу в «запроектну» стадію при порушенні меж та/або умов безпечної експлуатації енергоблоку АЕС. Незважаючи на покращення характеристик надійності нового цифрового мікроелектронного устаткування, підвищення якості керуючих систем безпеки АЕС по функції захисту є пріоритетною науково-технічною задачею. Одним з методів її вирішення є забезпечення проектного значення часу відновлення працездатності обладнання КСБ при наявності прихованих несправностей типу «неспрацьовування», які не виявляються існуючими засобами безперервного автоматичного моніторингу. Забезпечення заданого значення часу відновлення тісно пов'язане з тєстопридатністю обладнання захисту в частині перевірки та діагностування всіх типів несправностей, комбінації яких в резервованих компонентах устаткування можуть призводити до відмов типу «неспрацьовування».

Проблеми тестування, діагностування та ремонту цифрових систем знайшли відображення в діяльності вчених: Y. Zorian, M. Abramovich, J. Bergeron, Z. Navabi, A. Jerraya, J. Abraham, H. Fujiwara, I. Pomeranz, P. Убар, А.М. Романкевич, П.П. Пархоменко, Ю.В. Малишенко, В.Н. Ярмолік, А.Ю. Матросова, С. Шукур'ян, Ю.А. Скобцов, М.Ф. Каравай, В.С. Харченко, Л.В. Дербунович, Р. Шейнаукас, Н. Євтушенко, Р. Базилевич, В. Мелік'ян, Д. Брюле, Б. Вінтер, Д. Вуд, Д.В. Гаскаров, Б. Гласс, Р. Джонсон, В.В. Карібський, Е. Клетски, Е. Лавлер, П.П. А. Авициєніц, Дж. Лапрі, Дж. Добсон, Б. Рандел, М.А. Ястребенецький.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувалися в ПрАТ «СНВО “Імпульс”» (м. Северодонецьк) і Харківському національному університеті радіоелектроніки (м. Харків) у відповідності з такими програмами, планами, темами: 1) «Програма проведення повузлової заміни підсистем АСУ ТП енергоблоків з ВВЕР-1000, ВВЕР-440» ПМ-Д.0.03.416-09; 2) «Комплексна програма модернізації та підвищення безпеки енергоблоків атомних станцій (розпорядження Кабінету Міністрів України №504-р від 29.08.2002); 3) Держбюджетна НДР «Розробка математичних методів, алгоритмів та інструментальних засобів надшвидких перетворень зображень», Розділ «Розробка основ нових інформаційних технологій в автоматизованому проектуванні, діагностиці засобів обчислювальної техніки» (№ ДР 0101U001948); 4) Теорія й проектування енергозберігаючих цифрових обчислювальних систем на кристалах, що моделюють і підсилюють функціональні можливості людини, д/б № 232, 2009, № ДР 0109U001646; 5) Мультипроцесорна система пошуку, розпізнавання та прийняття рішень для інформаційної комп'ютерної екосистеми, д/б № 259-1, 2011, № ДР 0111U002956.

Мета дослідження – підвищення якості та надійності критичних систем керування АЕС за рахунок розробки методів функціонального тестування для перевірки і діагностування дефектів типу «неспрацьовування» в момент їх виникнення, що забезпечують відновлення працездатності несправних компонентів в реальному часі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Виконати аналіз методів моніторингу та діагностування технічного стану цифрового блоку функції захисту для керуючих систем безпеки енергоблоків АЕС.

2. Розробити метод забезпечення тестопридатності блоку захисту, що використовує логічні функціональні елементи, доповнені арифметичними операціями.

3. Розробити метод синтезу типових функціональних елементів блоку захисту на основі використання арифметичних операцій.

4. Розробити метод перевірки та діагностування обладнання захисту на основі використання функціональних логічних елементів з арифметичними операціями.

5. Удосконалити метод дедуктивного аналізу для моделювання і діагностування функціональних порушень цифрових компонентів блоку захисту критичних систем керування.

6. Виконати імплементацію методів тестування та діагностування цифрового обладнання захисту, побудованого з використанням функціональних елементів з арифметичними операціями.

Об'єкт дослідження – процеси функціонування, тестування й діагностування цифрового обладнання критичних систем керування енергоблоками атомних станцій.

Предмет дослідження – моделі та методи функціонального тестування цифрового обладнання критичних систем керування енергоблоками атомних станцій, стандарти забезпечення тестопридатності, перевірки та діагностування несправностей типу «неспрацювання» при створенні обладнання КСБ з використанням функціональних логічних елементів на основі арифметичних операцій.

Методи дослідження: булева алгебра, теорія цифрових автоматів і перемикальних схем – для побудови моделей функціонального тестування цифрового обладнання; теорія алгоритмів, методи проектування та моделювання цифрових систем – для синтезу та верифікації тестів, структур даних і сервісного обслуговування устаткування КСБ; засоби синтезу схем і аналізу функціональних покриттів – для створення та верифікації програмно-апаратної інфраструктури тестування цифрового обладнання критичних систем керування енергоблоками атомних станцій.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано метод забезпечення тестопридатності блоку захисту, який характеризується використанням логічних елементів, доповнених арифметичними операціями, що дає можливість здійснювати моніторинг проходження зміни вхідного безперервного сигналу через функціональні елементи до дискретного вихідного елемента, який формує команду захисту на конкретний виконавчий механізм.

2. Вперше запропоновано метод синтезу типових функціональних елементів блоку захисту, який характеризується використанням арифметичних операцій при обробленні вхідних і формуванні вихідних сигналів, що дає можливість проектувати цифрові схеми керування, в яких виконується моніторинг технічного стану усіх компонентів у процесі їх функціонування.

3. Вперше запропоновано метод моніторингу і діагностування обладнання захисту, який характеризується використанням логічних елементів з арифметичними операціями, що дає можливість визначати функціональні несправності за розузгодженням між значеннями вихідних сигналів у відповідних функціональних елементах реального блоку захисту та програмній моделі об'єкта діагностування.

4. Удосконалено метод дедуктивного аналізу цифрових систем, який відрізняється можливістю моделювання функціональних порушень

компонентів блоку захисту на робочих впливах і побудовою таблиць діагностування для подальшого відновлення працездатності в реальному часі.

Практичне значення отриманих результатів:

1) методи тестування та діагностування цифрового обладнання захисту, побудованого з використанням функціональних елементів з арифметичними операціями, доведено до імплементації в реальний технологічний процес моніторингу та діагностування обладнання захисту КСБ на всіх етапах життєвого циклу даного обладнання (розробка, виготовлення, випробування, впровадження, промислова експлуатація на АЕС);

2) підвищено тестопридатність обладнання захисту КСБ з використанням функціональних елементів на базі арифметичних операцій, що дозволяє забезпечити моніторинг і діагностування несправностей типу «неспрацювання», які відносяться до категорії прихованих в існуючих реалізаціях обладнання КСБ з використанням стандартних функціональних елементів;

3) створено методику практичної реалізації та впровадження процедур моніторингу і діагностування функціональних порушень для обладнання захистів КСБ, що побудовано на функціональних елементах на основі використання арифметичних операцій.

Отримані в процесі досліджень наукові висновки та положення дисертації є обґрунтованими і достовірними. Обґрунтованість підтверджується: 1) принциповою відсутністю обмежень на можливість реалізації функціональних елементів з використанням арифметичних операцій, без використання логічних і реляційних операцій в теорії автоматів та структурного синтезу логічних автоматів; 2) відповідністю таблиць істинності існуючих функціональних елементів на базі логічних реляційних операцій («порівняння з уставкою», «І», «АБО», «2 з 4») та їх розроблених аналогів на базі арифметичних операцій; 3) результатами практичного використання розроблених методів і методик при проектуванні та випробуваннях устаткування КСБ.

Результати дисертації у складі моделей та методів впроваджено в організаціях: 1) ПрАТ «СНВО “Імпульс”» при проектуванні КСБ та КСНЕ існуючих та перспективних енергоблоків: ЗАЕС-1,2; ХАЕС-3,4; АЕС-2006 (акт впровадження від 12.03.12 р.) 2) Харківський національний університет радіоелектроніки, в навчальному процесі (акт про впровадження від 11.09.2012).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати отримані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих зі співавторами, здобувачеві належать: [3] – математичний апарат і метод приростів для підвищення тестопридатності критичних систем керування, метод забезпечення тестопридатності блоку захисту з використанням логічних елементів, доповнених арифметичними операціями; [4] – метод моніторингу та діагностування обладнання захисту, який характеризується використанням логічних елементів з арифметичними операціями; [6] – обґрунтування

тестопридатності багаторозрядної логіки захисту у критичних системах керування; [7] – методика практичної реалізації процедур моніторингу та діагностування для обладнання захисту КСБ, побудованого з використанням функціональних елементів на базі арифметичних операцій; [8] – досвід модернізації обладнання АСУ ТП енергоблоків АЕС.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися на двох наукових конференціях, що мають безпосереднє відношення до теми дисертаційної роботи: 1) міжнародна науково-технічна конференція «Информационные и управляющие системы АЭС: Аспекты безопасности» (м. Харків, червень 2010 р.); 2) міжнародна науково-технічна конференція Regional Workshop on Modernization of Instrumentation and Control (I&C) Systems Innuclear Power Plants (Portoroz, Slovenia, 2011 р.)

Публікації. Результати наукових досліджень відображено у 8 друкованих працях: 6 статтях, опублікованих у наукових фахових виданнях України, та 2 матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить 143 сторінки основного тексту, 19 рисунків, 19 таблиць. Її структура складається з вступу, 5 розділів, 35 підрозділів, висновків, списку використаних джерел з 105 назв (на 12 с.), 1 додатку.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності розв’язуваної задачі, формулювання мети, об’єкта та задач дослідження, сукупність наукових результатів, що виносяться на захист, відомості про їх апробацію та реалізацію.

Перший розділ присвячено розгляду функцій, виконуваних різними підсистемами інформаційно-керуючих систем, функціональному аналізу обладнання КСБ, класифікації відмов, огляду методів безперервного автоматичного моніторингу та діагностування. Зроблено висновок: основним джерелом прихованих несправностей в устаткуванні захисту будь-якого типу (цифрового чи аналогового) є використання функціональних елементів «порівняння з уставкою», «І», «АБО», «2 з 4-х », побудованих на базі логічних операцій і операцій відношення з виходом, визначуваним тільки двома станами 0 (режим очікування) або 1 (спрацьовування захисту), що не дозволяє забезпечити виконання безперервного контролю працездатності зазначених елементів на спрацьовування. Для усунення цього недоліку запропоновано реалізувати функціональні елементи обладнання захисту на базі виключно арифметичних операцій без використання логічних операцій і операцій відношення.

У другому розділі запропоновано новий метод забезпечення тестопридатності блоку захисту, який характеризується використанням логічних елементів, доповнених арифметичними операціями, та удосконалено метод дедуктивного аналізу цифрових систем.

Підвищення тестопридатності критичних систем керування здійснюється шляхом розробки додаткових моделей і методів тестового та

функціонального діагностування на базі використання багаторозрядного представлення вхідних даних та методів їх обробки в логічних схемах.

Об'єкт дослідження – критична система (КС) взаємодіючих програмно-апаратних компонентів. Стани КС, з урахуванням всіх типів можливих функціональних порушень (ФП) не виводять об'єкт за межі заданої функціональності, представлені булевою функцією в момент часу (такт) i :

$$Y_i = f(X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ni}, S_{i-1}), X_i, S_{i-1}, Y_i \in R = \{0, \dots, 1\}.$$

Модель ФП накладається на графову структуру функціональних модулів (рис. 1), що мають вхідні та вихідні транзакційні змінні. Транзакційний граф представлений дугами – функціональностями (сервісами) з моніторами (асерціями), а також вершинами, що формують стани КС, за допомогою змінних, пам'яті, інтерфейсних портів введення-виведення інформації, приймачів-передавачів, терміналів, комп'ютерів: $F = (A * B) \times S$, де $S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_m\}$ – вершини або стани КС при моделюванні тестових сегментів. Кожний стан $S_i = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{ij}, \dots, S_{ip}\}$ визначається значеннями істотних змінних КС (змінні, пам'ять, термінали, комп'ютери).

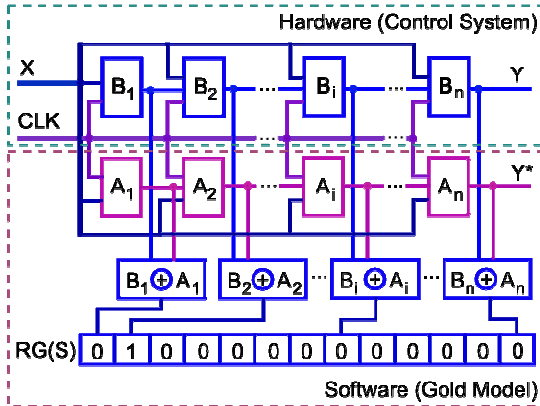


Рис. 1. Схема діагностування функціональних модулів КС

Кожному з функціональних блоків: $V = (B_1, B_2, \dots, B_i, \dots, B_n)$, $\bigcup_{i=1}^n B_i = V$; $\bigcap_{i=1}^n B_i = \emptyset$,

може бути поставлена у відповідність асерція $A_i \in A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$ для моніторингу функціональностей у часі та просторі. Сутність дедуктивного методу полягає в порівнянні вхідних і вихідних даних КС з метою виявлення ФП. При цьому виконуються процедури порівняння інформації на виході системи у штатному (функціональному) режимі та в ситуації, що викликає підозру. Приклади отримання дедуктивних функцій для елемента «2 з 3-х» наведено нижче (перший доданок – тест-вектор, другий і результат – таблиці істинності та транспортування ФП):

| X_1 | X_2 | X_3 | Y |
|-------|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

 \oplus

| X_1 | X_2 | X_3 | Y |
|-------|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

 $=$

| X_1 | X_2 | X_3 | L_1 |
|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

$$L_1 = X_1 X_3;$$

| X_1 | X_2 | X_3 | Y |
|-------|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

 \oplus

| X_1 | X_2 | X_3 | Y |
|-------|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

 $=$

| X_1 | X_2 | X_3 | L_1 |
|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |

$$L_2 = X_1(X_2 \oplus X_3).$$

Дедуктивні функції L_1, L_2 записано у вигляді диз'юнктивної нормальної форми за конститuentами одиниці таблиць транспортування ФП. Приклади отримання дедуктивних функцій для елемента «2 з 4-х» наведено нижче.

| X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | Y |
|-------|-------|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

 \oplus

| X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | Y |
|-------|-------|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

 $=$

| X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | L_1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

$$L_1 = X_1 X_4 (\bar{X}_2 \vee X_2 X_3);$$

| X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | Y |
|-------|-------|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

 \oplus

| X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | Y |
|-------|-------|-------|-------|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

 $=$

| X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | L_1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

$$L_2 = X_1 X_2 X_4.$$

Для апаратної реалізації дедуктивно-паралельного моделювання на основі симулятора фірми Aldec, USA може бути використана обчислювальна структура, представлена на рис. 2.

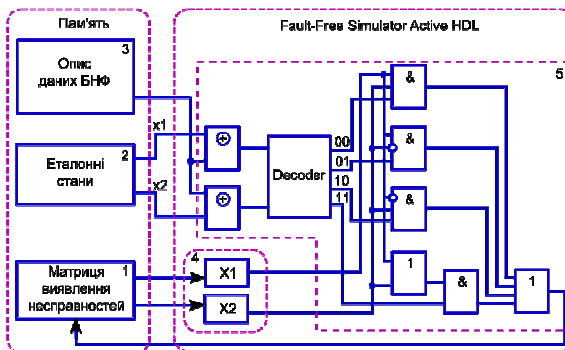


Рис. 2. Структура апаратного моделювання

Модифікований дедуктивний метод пошуку несправностей дозволяє виявити не тільки константні несправності, але й функціональні порушення логічних елементів з використанням арифметичних операцій.

Загальним підходом, що забезпечує підвищення тестопридатності обладнання, є використання базових логічних елементів («І», «АБО», «2 з 3-х») з багаторозрядним поданням вхідних сигналів і логіки їх обробки, оскільки кількість різних комбінацій вхідних сигналів збільшується при цьому в степеневій залежності порівняно з використанням традиційної бінарної логіки. Одним з методів реалізації зазначених елементів є використання інтегральної оцінки (середнього арифметичного) значення від вхідних змінних. Наприклад, для елемента «І» (AND) з n – входами така

реалізація має вигляд: $y = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n}$, $x_1, \dots, x_n, y \in [0, \dots, 1]$. Для дослідження тестопридатності при одиничних несправностях аналітичні вирази моделюють поведінку входів і виходів елемента AND в обладнанні захисту (А) та в обладнанні діагностування (В):

$$y_A = \frac{x_{A1} + \dots + x_{Ai} + \dots + x_{An}}{n}; y_B = \frac{x_{B1} + \dots + x_{Bi} + \dots + x_{Bn}}{n}.$$

При відсутності несправностей по входах і виходах мають місце такі залежності:

$$\begin{aligned} x_{A1} = x_{B1}; \dots; x_{Ai} = x_{Bi}; \dots; x_{An} = x_{Bn}; y_A = y_B; \\ \Delta x_{A1} = \Delta x_{B1}; \dots; \Delta x_{Ai} = \Delta x_{Bi}; \dots; \Delta x_{An} = \Delta x_{Bn}; \\ \Delta y_A = \Delta y_B = \frac{\Delta x_{A1} + \dots + \Delta x_{Ai} + \dots + \Delta x_{An}}{n} = \frac{\Delta x_{B1} + \dots + \Delta x_{Bi} + \dots + \Delta x_{Bn}}{n}; \\ r_y = \Delta y_A - \Delta y_B = 0. \end{aligned}$$

Таким чином, за відсутності несправностей, розузгодження r_y між виходами у обладнання А і В дорівнює 0. При появі поодинокі константної несправності на будь якому вході i мають місце такі залежності:

$$\begin{aligned} \Delta x_{A1} = \Delta x_{B1}; \dots; \Delta x_{Ai} \neq \Delta x_{Bi}; \dots; \Delta x_{An} = \Delta x_{Bn}; \\ \Delta y_A = \frac{\Delta x_{A1} + \dots + \Delta x_{Ai} + \dots + \Delta x_{An}}{n}; \Delta y_B = \frac{\Delta x_{B1} + \dots + \Delta x_{Bi} + \dots + \Delta x_{Bn}}{n}; \\ r_y = \Delta y_A - \Delta y_B = \frac{\Delta x_{Ai} - \Delta x_{Bi}}{n} \neq 0. \end{aligned}$$

При появі поодинокій константній несправності по виходу мають місце такі залежності:

$$\Delta x_{A1} = \Delta x_{B1}; \dots; \Delta x_{Ai} = \Delta x_{Bi}; \dots; \Delta x_{An} = \Delta x_{Bn};$$

$$\Delta y_A \neq \Delta y_B = \frac{\Delta x_{A1} + \dots + \Delta x_{Ai} + \dots + \Delta x_{An}}{n} = \frac{\Delta x_{B1} + \dots + \Delta x_{Bi} + \dots + \Delta x_{Bn}}{n};$$

$$r = \Delta y_A - \Delta y_B \neq 0.$$

З наведених аналітичних моделей випливає, що застосування модифікації дедуктивного методу для багаторозрядної логіки дозволяє виявляти поодинокую несправність по входу елемента при появі зміни сигналу на даному вході; поодинокую несправність по виходу елемента при появі зміни сигналу по кожному з n входів або їх комбінації. Для комбінацій кратних несправностей по входах (або входах і виходах) можлива ситуація, коли несправності взаємно компенсують одна одну відносно вихідного значення у в обладнанні А і В, при цьому неузгодженість r дорівнює 0. Інтегральна обробка (середнє арифметичне) вхідних змінних дає тестопридатний результат для всіх випадків поодиноких несправностей в логічному елементі, побудованому на базі багаторозрядної логіки. У разі появи поодинокій константній несправності по одному входу (змінній), для її виявлення достатньо однієї зміни сигналу по даному входу на будь-яку величину, що перевищує значення «молодшого» біта АЦП, при цьому несправність виявляється за розузгодженням значення виходу логічного елемента у між обладнанням захисту (А) та устаткуванням діагностування (В).

Для випадків кратних несправностей теоретично можливою є ситуація, коли дві або більше несправностей компенсують взаємовплив на підсумковий інтегральний результат, тобто неузгодженість значення виходу елемента у між обладнанням захисту (А) та обладнанням діагностування (В) дорівнює 0, що є ознакою відсутності несправностей. Імовірність такого випадку визначається виразом: $L = \frac{1}{2^k} * \lambda^2$, де: λ – інтенсивність потоку

несправностей по одному входу в блоці елементів, що реалізує зазначену функцію, $1/\lambda$ (для типових мікросхем оцінюється в діапазоні от $10^{(-6)}$ до $10^{(-9)}$); k – розрядність АЦП, шт.; $(2^k)^{-1}$ – дільник, що враховує

багаторозрядне представлення вхідних параметрів.

У третьому розділі запропоновано новий метод синтезу типових функціональних елементів блоку захисту, який характеризується використанням арифметичних операцій при обробленні вхідних і формуванні вихідних сигналів.

Вирішення задачі синтезу функціональних елементів на базі арифметичних операцій ґрунтується на послідовності логічного проектування, що використовується при синтезі функціональних елементів з використанням

логічних операцій та операції відношення: формування таблиці істинності синтезованого елемента, згідно з його визначенням, призначенням і (словесним) описом принципу роботи, адаптація таблиці істинності існуючого елемента (прототипу) до таблиці істинності аналога на базі арифметичних операцій; розробка аналітичного виразу для функції, що описує роботу синтезованого елемента, згідно з наявною таблицею істинності; аналіз отриманої функції з метою побудови різних варіантів аналітичного виразу (на базі арифметичних операцій).

Функціональний елемент «НЕ» (інверсія) є найпростішим елементом. Таблиця істинності дискретного прототипу, що реалізує функцію «НЕ» і його адаптація до варіанту побудови елемента з використанням арифметичних операцій наведені на рис. 3 а).

Функціональний елемент «НЕ» (інверсія) у варіанті побудови з використанням арифметичних операцій може бути реалізований як операція віднімання від 1 значення вхідної змінної: $y=1-x$, де x – значення вхідної змінної; y – вихідне значення.

Синтез функціонального елемента «І». Таблиця істинності дискретного прототипу, що реалізує функцію «І», та його адаптація під варіант побудови з використанням арифметичних операцій наведено на рис. 3 б).

| Logic Not | | Arithmetic Not | | Logic And | | | Arithmetic And | | | Logic Or | | | Arithmetic Or | | |
|-----------|---|----------------|---|-----------|----|---|----------------|-----|------|----------|----|---|---------------|-----|-----|
| I | O | I | O | I1 | I2 | O | I1 | I2 | O | I1 | I2 | O | I1 | I2 | O |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0,0 | 1,0 | 0,5 | 0 | 1 | 1 | 0,0 | 1,0 | 1,0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1,0 | 0,0 | 0,5 | 1 | 0 | 1 | 1,0 | 0,0 | 1,0 |
| | | | | 1 | 1 | 1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1 | 1 | 1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| | | | | | | | 0,8 | 0,8 | 0,8 | | | | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| | | | | | | | 0,5 | 1,0 | 0,75 | | | | 0,5 | 1,0 | 1,0 |
| | | | | | | | 0,2 | 0,4 | 0,3 | | | | 0,2 | 0,4 | 0,3 |

а)

б)

в)

Рис. 3. Синтез функціональних елементів

Функціональний елемент «І» у варіанті побудови з використанням арифметичних операцій може бути реалізований як середнє арифметичне від суми вхідних змінних: $y=(1/n)*(x_1 + x_2 + \dots + x_n)$, де n – кількість вхідних змінних; x_i – значення вхідних змінних; y – вихідне значення.

Синтез функціонального елемента «АБО». Таблиця істинності дискретного прототипу, що реалізує функцію «АБО», та його адаптація під варіант побудови з використанням арифметичних операцій наведені на рис. 3 в).

Функціональний елемент «АБО» у варіанті побудови з використанням арифметичних операцій може бути реалізований аналогічно «І», з тією відмінністю, що використовується перемножування інверсій вхідних змінних $(1 - x_i)$ для обнулення у разі наявності хоча б одного значення, що дорівнює 1. У проміжних станах вихідне значення визначається аналогічно елементу «І», тобто як середнє арифметичне. Для арифметичної компенсації (скорочення) перемножуваних інверсій $(1 - x_i)$ використовується компенсаційний вираз $(1 - x_i)/(1 - x_i + 10^{-15})$, який забезпечує одержання не тільки 0 в чисельнику (при $x_i = 1$), але й захист від нуля в знаменнику (при $x_i = 1$), для чого в знаменнику використовується додавання «нескінченно малого» значення $1,2 \cdot 10^{-38}$, як найменшого в 4-х байтовому варіанті формату числа з плаваючою комою (float):

$$y = 1 + \frac{(1 - x_1) \cdot (1 - x_2) \cdot \dots \cdot (1 - x_n) \cdot ((1/n) \cdot (x_1 + x_2 + \dots + x_n) - 1)}{(1 - x_1 + 1,2 \cdot 10^{-38}) \cdot (1 - x_2 + 1,2 \cdot 10^{-38}) \cdot \dots \cdot (1 - x_n + 1,2 \cdot 10^{-38})}$$

де n – кількість вхідних змінних; x_i – значення вхідних змінних; y – вихідне значення.

У розділі описано синтез функціональних елементів «2 з 3-х», «2 з 4-х», «порівняння вхідного значення з пороговим значенням (уставкою)», «RS тригер», «порівняння з уставкою і зоною повернення», «обмеження», а також елементів часової обробки «демпфування», «часова затримка».

У четвертому розділі пропонується новий метод моніторингу і діагностування обладнання захисту, який характеризується використанням логічних елементів з арифметичними операціями.

При реалізації логічних елементів обладнання захисту з використанням арифметичних операцій, математична модель будь-якого i -го елемента може бути представлена в аналітичному вигляді:

$$y_i = f_i(x_{1i}, \dots, x_{ni}, p_{1i}, \dots, p_{ki}),$$

$$y_i \in D_{y_i}, \quad x_{1i} \in D_{X_{1i}}, \dots, x_{ni} \in D_{X_{ni}}, \quad p_{1i} \in D_{P_{1i}}, \dots, p_{ki} \in D_{P_{ki}},$$

де $y_i = f_i()$ – функція, що використовує арифметичні операції та описує алгоритм роботи i -го логічного елемента устаткування захисту; D_{y_i} –

область визначення значення вихідної змінної y_i для i -го логічного елемента устаткування захисту; x_{1i}, \dots, x_{ni} – n -вимірний вектор вхідних змінних для i -го логічного елемента устаткування захисту; $D_{X_{1i}}, \dots, D_{X_{ni}}$ – області

визначення значень вхідних змінних x_{1i}, \dots, x_{ni} для i -го логічного елемента

устаткування захисту; P_{i1}, \dots, P_{ki} – k-вимірний вектор настроювальних параметрів для i-го логічного елемента устаткування захисту; $D_{P_{i1}}, \dots, D_{P_{ki}}$ – області визначення значень параметрів P_{i1}, \dots, P_{ki} для i-го логічного елемента устаткування захисту.

Сутність методу – використання в діагностичному обладнанні ідентичних устаткуванню захисту функціональних алгоритмів і елементів (блоків), реалізованих у програмному коді. При цьому в обладнання захисту і діагностичне обладнання надходять функціонально ідентичні вхідні дані (змінні). За рахунок використання арифметичних операцій в функціональних елементах забезпечується можливість обчислення величини розузгодження за кожною вихідною (вхідною) змінною у кожному функціональному елементі; при цьому розузгодження обчислюється безпосередньо в діагностичному обладнанні.

Пропонований метод моніторингу і діагностування ґрунтується на визначенні наявності несправності при появі розузгодження між будь-якими двома ідентичними вихідними змінними функціонального елемента. Ознака несправного стану для i-го функціонального елемента устаткування захисту може бути представлена виразом: $y_{ai} \neq y_{bi}$, де y_{ai} , y_{bi} – значення функціонально ідентичної змінної, що характеризує стан виходу i-го логічного елемента обладнання захисту (А) і діагностичного обладнання (В).

Оскільки стан змінних в обладнанні захисту в загальному вигляді є динамічним, необхідно враховувати часову залежність при формуванні ознаки несправності i-го функціонального елемента устаткування захисту:

$y_{ai}(t) \neq y_{bi}(t)$, де $y_{ai}(t)$, $y_{bi}(t)$ – значення функціонально ідентичної змінної, що характеризує стан виходу i-го елемента обладнання захисту (А) і діагностичного обладнання (В) в залежності від моменту часу t .

З урахуванням, відсутності синхронності роботи обладнання захисту (А) та діагностичного обладнання (В), що визначається відмінностями динамічних характеристик в частині тривалості циклів введення й обробки даних, а також транспортного запізнювання на передавання даних від устаткування захисту до діагностичного обладнання, доцільно визначити в явному вигляді величину розузгодження вихідної змінної для i-го функціонального елемента устаткування захисту: $\text{mod}(r_i(t)) > k_{i1}$, де $r_i(t) = y_{ai}(t) - y_{bi}(t)$ – значення розузгодження; k_{i1} – значення уставки розузгодження.

Перевищення або відсутність перевищення значення розузгодження відносно величини заданого значення (уставки) може використовуватися як критерій визначення наявності або відсутності несправності в частині

обладнання захисту, що реалізується з використанням відповідних функціональних елементів.

Значення $y_{ai}(t)$, $y_{bi}(t)$ є миттєвими значеннями і не можуть використовуватися для коректного порівняння станів двох несинхронних типів обладнання у динамічному режимі, тому доцільно здійснювати усереднення миттєвих значень $y_{ai}(t)$, $y_{bi}(t)$ перед їх використанням при

обчисленні розузгодження $r_i(t)$: $\text{mod}(r_i(t)) > k_{ri}$, де

$$r_i(t) = \sum_j^{j+\Delta p} y_{ai} / \Delta p - \sum_j^{j+\Delta p} y_{bi} / \Delta p - \text{значення розузгодження}; k_{ri} - \text{значення}$$

уставки розузгодження.

У п'ятому розділі пропонується імплементація запропонованих моделей, методів, програмно-апаратних засобів контролю в технічні умови підприємства.

Основним експериментальним результатом, отриманим в дисертаційній роботі, є підвищення тестопридатності обладнання в частині безперервного контролю та діагностування несправностей типу «неспрацьовування» по функції захисту, що відносилися раніше до категорії прихованих в існуючих реалізаціях аналогічного обладнання.

Ефективність методу оцінюється за збільшенням значення коефіцієнта готовності типового блоку елементів, що реалізують функцію захисту, з використанням аналітичного виразу:

$$K_g = \frac{T_o}{(T_o + T_v * (1 - k) + k * (T_v + T_{пп} / 2))} = \frac{T_o}{(T_o + T_v + k * T_{пп} / 2)},$$

де T_o – середнє напрацювання функції на відмову (з урахуванням явних і прихованих несправностей); T_v – середній час відновлення системи, що виконує задану функцію, (для явних несправностей); $T_{пп}$ – часовий інтервал між періодичними перевірками (випробуваннями), які виявляють приховані несправності; k – частковий коефіцієнт прихованих несправностей відносно їх загальної кількості (діапазон від 0 до 1); K_g – коефіцієнт готовності за заданою функцією.

Збільшення значення коефіцієнта готовності K_g досягається за рахунок зниження значення часткового коефіцієнта прихованих несправностей k при застосуванні запропонованого методу для значень $T_o = 200000h$ (середнє напрацювання на відмову типового блоку елементів), $T_v = 1h$ (типове значення часу відновлення) і $T_{пп} = 1500h$ (два місяці – типовий інтервал між періодичними перевірками-випробуваннями).

На рис. 4 наведено інфраструктуру діагностування системи керування КС. В першій контур охолодження ядерного реактора убудовано датчики (Sensors) тиску P , температури T , рівня L , витрат F . Сигнали від датчиків передаються через АЦП (ADC) на модуль (UUT, Unit Under Test), що

підлягає тестуванню, та еталонну модель (SUT, Software Under Test). При виникненні аварії виникає сигнал А. У всіх інших випадках здійснюється on-line тестування блока керування UUT, паралельно якому під'єднано «золоту» еталонну модель, що дозволяє виконувати діагностування модуля UUT із заданою глибиною з використанням регістру станів (SR, State Register). Результатом діагнозу може бути адреса (AFB, Address of Faulty Block) будь-якого компонента системи, що замінюється, в цілях наступного відновлення працездатності (RFB, Repair of Faulty Block) ручним або автоматичним способом.

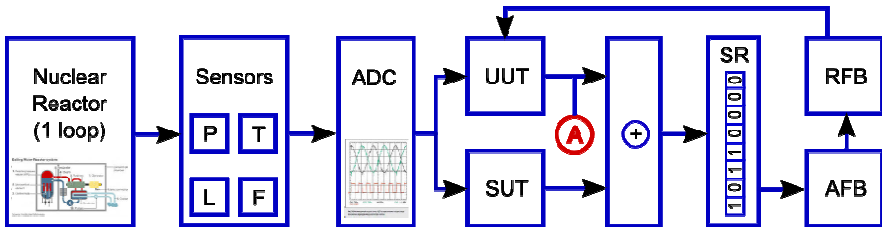


Рис. 4. Інфраструктура діагностування системи керування

ВИСНОВКИ

Проведені в рамках дисертаційної роботи дослідження характеризуються розв'язанням актуальної науково-практичної задачі підвищення якості та надійності критичних систем керування АЕС за рахунок розробки методів функціонального тестування для перевірки та діагностування дефектів типу «неспрацьовування» в момент їх виникнення, що забезпечують відновлення працездатності несправних компонентів в реальному часі. В якості основного підходу до вирішення поставленої задачі визначено використання функціональних елементів на базі арифметичних операцій при реалізації алгоритмів захисту, що дозволяє порівняти стан кожного вхідного і вихідного сигналу (змінної) кожного елемента обладнання захисту зі станом функціонально ідентичного елемента обладнання моніторингу і діагностування. Отримано такі результати:

1. Новий метод забезпечення тестопридатності блоку захисту з використанням функціональних елементів на базі арифметичних операцій, що забезпечує безперервний моніторинг і діагностування обладнання КСБ за рахунок проходження будь-якої зміни вхідного безперервного сигналу в межах роздільної здатності АЦП через всю схему алгоритму: від АЦП і далі через функціональні елементи до елемента керування конкретним виконавчим механізмом.

2. Новий метод синтезу типових функціональних елементів блоку захисту на базі арифметичних операцій (додавання, віднімання, ділення,

множення) для базових функціональних елементів обладнання захисту («І», «АБО», «2 з 3-х», «2 з 4-х», «RS тригер»).

3. Новий метод моніторингу і діагностування обладнання захисту, побудованого з використанням функціональних елементів на базі арифметичних операцій, який забезпечує виявлення несправностей типу «неспрацьовування» у функціональних елементах обладнання захисту КСБ за розузгодженням значень виходів функціонально ідентичних елементів обладнання захисту з одного боку і діагностичного обладнання з іншого.

4. Удосконалений метод дедуктивного аналізу цифрових систем, який відрізняється від аналогів можливістю моделювання функціональних порушень компонентів блоку захисту на робочих впливах і побудовою таблиць діагностування для подальшого відновлення працездатності в реальному часі.

5. Методика реалізації процедур моніторингу і діагностування обладнання захисту, побудованого з використанням функціональних елементів на базі арифметичних операцій.

6. Результати досліджень використано при перевірках і випробуваннях ПТК КСБ в ПрАТ «СНВО “Імпульс”», а також у процесі навчання в Харківському національному університеті радіоелектроніки.

Подальше використання результатів даного дослідження можливо і доцільно для розробки ПТК КСБ нових енергоблоків АЕС з підвищеними вимогами до надійності, моніторингу та діагностування, у тому числі для виявлення несправностей типу «неспрацьовування». Дослідження варто продовжити в напрямку розвитку засобів автоматизації проектування обладнання КСБ і КСНЕ, що використовує функціональні елементи на базі арифметичних операцій, та розробки засобів автоматичного моніторингу зазначеного обладнання в процесі виробництва та експлуатації за призначенням у складі інформаційної керуючої системи енергоблоків АЕС.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Герасименко К.Е. Методы непрерывного контроля и диагностирования оборудования управляющих систем безопасности энергоблоков АЭС по функции защит / К.Е. Герасименко // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – №3 (44). – С. 152-156.

2. Герасименко К.Е. Использование непрерывных функций в элементах оборудования защит АЭС для диагностирования неисправностей типа «несрабатывание по требованию» / К.Е. Герасименко // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2011. – №1 (49). – С. 29-33.

3. Хаханов В.И. Метод приращений для повышения тестопригодности логических схем управления критическими системами / К.Е. Герасименко, В.И. Хаханов // Радиоэлектроника и информатика.– 2012.– №3.– С.45-52.

4. Герасименко К.Е. Повышение тестопригодности критических систем управления / К.Е. Герасименко, В.И. Хаханов // АСУ и приборы автоматики: Всеукр. межвед. научно-техн. сборник.– 2011.– Вып. 157.– С. 107-116.

5. Герасименко К.Е. Метод повышения контролепригодности критических систем управления АЭС / К.Е. Герасименко // АСУ и приборы автоматики: Всеукр. межвед. научно-техн. сборник.–2012.–Вып.159.–С.53-57.

6. Хаханов В.И. Обоснование контролепригодности многоуровневой логики защит в критических системах управления / В.И. Хаханов, К.Е. Герасименко // АСУ и приборы автоматики: Всеукр. межвед. научно-техн. сборник.– 2012.– Вып. 160.– С. 54-58.

7. Пивоваров Г.Ю. Программно-технические комплексы управляющих систем безопасности и систем нормальной эксплуатации АСУ ТП АЭС / Г.Ю. Пивоваров, А.С. Набатов,, В.И. Макарова, А.В. Гомон, К.Е. Герасименко // Информационные и управляющие системы АЭС. Аспекты безопасности: материалы IV международной научно-технической конференции.– 1-2 июня 2010. – Харьков.– С.11.

8. Gerasymenko K. Ukrainian experience in modernization of instrumentation and control systems of NPP's / K. Gerasymenko, V. Kryvtsov // Regional workshop on modernization of instrumentation and control (I&C) systems in nuclear power plants.– May, 2011. – Portoroz, Slovenia.– P. 7.

АНОТАЦІЯ

Герасименко К.Е. Методи функціонального тестування критичних систем керування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Харківський національний університет радіоелектроніки, МОН України, Харків, 2013.

Мета дисертаційного дослідження – підвищення якості та надійності критичних систем керування АЕС за рахунок розробки методів функціонального тестування для перевірки і діагностування дефектів типу «неспрацьовування» в момент їх виникнення, що забезпечують відновлення працездатності несправних компонентів в реальному часі. Об'єкт дослідження – процеси функціонування, тестування й діагностування цифрового обладнання критичних систем керування енергоблоками атомних станцій. Предмет дослідження – моделі та методи функціонального тестування цифрового обладнання критичних систем керування енергоблоками атомних станцій, стандарти забезпечення тестопридатності, перевірки та діагностування несправностей типу «неспрацьовування» при створенні обладнання КСБ з використанням функціональних логічних елементів на основі арифметичних операцій.

Основні результати: новий метод забезпечення тестопридатності блоку захисту з використанням функціональних елементів на базі арифметичних операцій, що забезпечує безперервний моніторинг і діагностування обладнання КСБ за рахунок проходження будь-якої зміни вхідного безперервного сигналу в межах роздільної здатності АЦП через всю схему алгоритму: від АЦП і далі через функціональні елементи до елемента керування конкретним виконавчим механізмом; новий метод синтезу

типових функціональних елементів блоку захисту на базі арифметичних операцій (додавання, віднімання, ділення, множення) для базових функціональних елементів обладнання захисту («I», «АБО», «2 з 3-х», «2 з 4-х», «RS тригер»); новий метод моніторингу і діагностування обладнання захисту, побудованого з використанням функціональних елементів на базі арифметичних операцій; методика реалізації процедур моніторингу і діагностування обладнання захисту, побудованого з використанням функціональних елементів на базі арифметичних операцій.

Ключові слова: верифікація, діагностування, тестування, АЕС, керуюча система безпеки, функція захисту, прихована несправність.

АННОТАЦИЯ

Герасименко К.Е. Методы функционального тестирования критических систем управления.– На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты.– Харьковский национальный университет радиоэлектроники, МОН Украины, Харьков, 2013.

Цель диссертационного исследования – повышение качества и надежности критических систем управления АЭС за счет разработки методов функционального тестирования для проверки и диагностирования дефектов типа «несрабатывание» в момент их возникновения, обеспечивающих восстановление работоспособности неисправных компонентов в реальном масштабе времени.

Объект исследования – процессы функционирования, тестирования и диагностирования цифрового оборудования критических систем управления энергоблоками атомных станций.

Предмет исследования – модели и методы функционального тестирования цифрового оборудования критических систем управления энергоблоками атомных станций, стандарты обеспечения тестопригодности, проверки и диагностирования неисправностей типа «несрабатывание» при создании оборудования УСБ с использованием функциональных логических элементов на основе арифметических операций.

Сущность научного исследования заключается в разработке методов функционального тестирования на рабочих воздействиях и диагностирования дефектов типа «несрабатывание» в момент их возникновения в цифровых компонентах критических систем управления, построенных на основе логических элементов с использованием арифметических операций, обеспечивающих мониторинг и восстановление работоспособности неисправных компонентов в реальном масштабе времени, а также повышение качества и надежности блока защит АЭС.

Основные результаты: 1) новый метод обеспечения тестопригодности блока защит с использованием функциональных элементов на базе арифметических операций, обеспечивающий непрерывный мониторинг и

диагностирование оборудования УСБ за счет прохождения любого изменения входного непрерывного сигнала в пределах разрешающей способности АЦП через всю схему алгоритма: от АЦП и далее через функциональные элементы до элемента управления конкретным исполнительным механизмом; 2) новый метод синтеза типовых функциональных элементов блока защит на базе арифметических операций (сложение, вычитание, деление, умножение) для типовых функциональных элементов оборудования защит («и», «или», «2 из 3», «2 из 4», «RS триггер»); 3) новый метод мониторинга и диагностирования оборудования защит, построенного с использованием функциональных элементов на базе арифметических операций, обеспечивающий обнаружение неисправностей типа «несрабатывание» в функциональных элементах оборудования защит УСБ по рассогласованию значений выходов функционально идентичных элементов в оборудовании защит с одной стороны и диагностическом оборудовании с другой; 4) усовершенствованный метод дедуктивного анализа цифровых систем, который отличается возможностью моделирования функциональных нарушений компонентов блока защит на рабочих воздействиях и построением таблиц диагностирования для последующего восстановления работоспособности в реальном масштабе времени; 5) методика реализации процедур мониторинга и диагностирования оборудования защит, построенного с использованием функциональных элементов на базе арифметических операций.

Результаты исследований использованы при проверках и испытаниях ПТК УСБ в ЧАО «СНПО “Импульс”», а также в процессе обучения в Харьковском национальном университете радиоэлектроники.

Практическая значимость результатов исследования:

1) имплементация методов тестирования и диагностирования цифрового оборудования защит, построенного с использованием функциональных элементов с арифметическими операциями, в реальный технологический процесс мониторинга и диагностирования оборудования защит УСБ на всех этапах жизненного цикла (разработка, изготовление, испытание, внедрение, промышленная эксплуатация на АЭС);

2) повышение тестопригодности оборудования защит УСБ с использованием функциональных элементов на базе арифметических операций, что позволяет обеспечить мониторинг и диагностирование неисправностей типа «несрабатывание», относящихся к категории скрытых в существующих реализациях оборудования УСБ, использующих стандартные функциональные элементы;

3) создание методики практической реализации и внедрения процедур мониторинга и диагностирования функциональных нарушений для оборудования защит УСБ, использующего функциональные элементы на основе использования арифметических операций.

Ключевые слова: верификация, диагностирование, тестирование, АЭС, управляющая система безопасности, функция защит, скрытая неисправность.

ABSTRACT

Gerasimenko K.E. Methods for functional testing critical control systems. – Manuscript.

PhD thesis (candidate degree of technical sciences) in speciality 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2013.

The aim of the research is improving the quality and reliability of critical control systems for nuclear power plants through the development of methods for functional testing to diagnose faults, such as “nonoperation” at the time of their occurrence, providing repair of faulty components in real-time.

Main results: 1) a new method for providing testability of the protection unit, built by using functional elements based on arithmetic operations, and providing continuous monitoring and diagnosis of the control protection system equipment by passing any change of the input continuous signal is within the resolution of the ADC through the entire circuit: from ADC through the functional elements up to the specific control actuator; 2) a new method for synthesizing typical functional elements of the protection block based on arithmetic operations (addition, subtraction, multiplication, division) for standard functional elements of protection equipment (“and”, “or”, “2 of 3”, “2 of 4”, “RS flip-flop”); 3) a new method for monitoring and diagnosing the protection equipment, built by using functional elements based on arithmetic operations, which provides detection of faults “nonoperation” in the functional elements of the protection equipment on the basis of mismatch of output values of functional identical elements of the protection equipment and other diagnostic tools; 4) methodology for monitoring and diagnosing the protection equipment, built on the use of functional elements based on arithmetic operations.

Key words: verification, diagnosis, testing, nuclear power plant, control protection system, protection function, hidden fault.

Відповідальний випусковий **Свищ В.М.**

Підп. до друку 18.05.13. Формат 60x84¹/₁₆. Папір друк.; Умов. друк. арк. 1,2

Облік. вид. арк. 1,0. Зам. № 11-71; Тираж 120 прим.

Надруковано у видавництві ЧП “Степанов В.В.”

61168, Харків, вул. акад. Павлова, 311