

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**Татаренко Денис Анатолійович**

**УДК 681.5:681.32-181.48**

**ПРОГРАМОВАНІ ЛОГІЧНІ КОНТРОЛЕРИ З ВБУДОВАНИМИ ЗАСО-  
БАМИ ТЕСТОВОГО ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ**

**Спеціальність 05.13.05 – елементи та пристрої обчислювальної техніки  
та систем керування**

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Харків – 2007**

Дисертація є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматики та управління в технічних системах Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,  
**Дербунович Леонід Вікторович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри автоматики та управління в  
технічних системах

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Фурман Ілля Олександрович**,  
Харківський державний технічний університет сіль-  
ського господарства ім. П. Василенко,  
завідувач кафедри автоматизації сільського  
господарства та комп'ютерних технологій

кандидат технічних наук, доцент  
**Леонов Сергій Юрійович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
доцент кафедри обчислювальної техніки та програ-  
мування

Захист відбудеться 30 жовтня 2007 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізо-  
ваної вченої ради Д 64.050.14 в Національному технічному університеті  
«Харківський політехнічний інститут» за адресою 61002, м. Харків, вул.  
Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного  
університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « 10 » вересня 2007 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Ліберг І.Г.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток субмікронних технологій і масове промислове застосування мікропроцесорів, мікроконтролерів, програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС), можливість розміщення на одному кристалі до  $10^9$  транзисторів, підвищення тактової частоти роботи електронних елементів до  $1\div 5$  ГГц, дозволяють перейти до створення систем на одному кристалі (СОК) або печатній платі, які володіють принципово новими архітектурними і функціональними характеристиками: самоорганізацією, реконфігурацією, штучним інтелектом.

В даний час більшість сучасних пристроїв і систем управління динамічними об'єктами будується на основі високонадійних і легко компонованих програмованих логічних контролерів (ПЛК), які пристосовані до роботи у важких промислових умовах. Використовування ПЛК для управління складними об'єктами, помилки в управлінні якими недопустимі, спричиняє за собою необхідність рішення задач забезпечення необхідного рівня надійності, працездатності, продуктивності і швидкої адаптації до класу вирішуваних задач. Відомі методи підвищення надійності і відмовостійкості цифрових пристроїв і систем управління засновані на використуванні програмно-апаратних засобів діагностування технічного стану і відновлення працездатності пристрою за наявності відмов, дефектів обумовлених типів і кратності.

Аналіз причин відмов систем управління, побудованих на сучасній мікропроцесорній базі і функціонуючих у виробничих умовах, показує, що інтенсивність відмов системи в значній мірі визначається впливом нестійких переважаючих несправностей (ПН) і збоїв. Експериментальні оцінки кількісних співвідношень між стійкими і нестійкими несправностями, отримані багатьма дослідниками, підтверджують, що 90% відмов в мікроконтролерних системах управління промислового застосування, обумовлено впливом нестійких несправностей. В цьому випадку відновлення працездатності системи можливо шляхом повторної «прокрутки» сегменту управляючої програми, на якому з'явилася нестійка несправність. Виявлення таких несправностей здійснюється вбудованими засобами функціонального діагностування. Система вбудованого тестового діагностування, що функціонує в режимах профілактичного контролю або мікродіагностики багатопроцесорних ПЛК (БПЛК), дозволяє знайти клас стійких несправностей, скоротити час і вартість технічного обслуговування. Ефективність вбудованих засобів діагностування підвищується, якщо самі засоби контролю самоперевіряються або легко тестується правильність їх функціонування. Тому розробка таких вбудованих засобів тестового і функціонального діагностування, використання їх в контролерах промислового застосування є актуальною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Розробка основних положень роботи здійснювалася відповідно до планів НДР і програм, що вико-

нуються на кафедрі автоматики і управління в технічних системах НТУ «ХП», а саме: «Розробка методик оптимального управління станом динамічних систем в умовах невизначеності» план НДР МОН України (№ ДР 0101U001691); «Співзвуччя» пошукова тема НАН України «Розробка комплексів мікропроцесорних технічних засобів контролю і регулювання рівня розплаву при вирощуванні ЩГК», (№ ДР 0101U006612), «Темп» пошукова тема НАН України «Розробка нової системи та алгоритмів автоматизованого управління вирощуванням великогабаритних кристалів», (№ ДР 0103U003476), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка і вдосконалення моделей, методів і алгоритмів синтезу і логічного проектування ПЛК з вбудованими засобами тестового та функціонального діагностування з гарантованою повнотою виявлення несправностей і мінімальними тимчасовими і апаратними витратами на виявлення несправностей і відновлення працездатності.

Мета роботи досягається рішенням наступних задач:

1. Аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку типових структур ПЛК, особливостей їх функціонування як управляючих пристроїв промислового призначення.
2. Розробка діагностичних моделей ПЛК функціонально-структурного і логічного рівнів з урахуванням особливостей функціонування ПЛК, можливостей сучасних електронних технологій і вимог міжнародних стандартів проектування.
3. Розробка методів синтезу вбудованих на кристал або печатну плату програмно-апаратних засобів тестового та функціонального діагностування, які перевершують по ефективності існуючі методи.
4. Розробка методів синтезу легко тестуємих та самоперевіряємих модулів генераторів детермінованих, псевдовипадкових і псевдовичерпних тестів, синдромно - сигнатурних аналізаторів на зсувних регістрах з лінійними і нелінійними зворотними зв'язками і клітинних автоматах.
5. Застосування розроблених методів синтезу для реалізації вбудованих засобів діагностування на ПЛІС, а також самотестуємих і легко перевіряємих функціональних модулів ПЛК.

*Об'єкт дослідження* – ПЛК і цифрові пристрої (ЦП) на одному кристалі або печатній платі, процеси їх тестового і функціонального діагностування.

*Предмет дослідження* – моделі, методи і алгоритми синтезу легко тестуємих вбудованих засобів діагностування і функціональних модулів ПЛК.

*Методи дослідження* – представлені апаратами теорії булевих функцій і цифрових автоматів для організації діагностичних експериментів в ПЛК і синтезу легко тестуємих модулів ПЛК; теорії графів для розробки графових моделей блоків ПЛК і організації процедур тестового та функціонального діагностування; методи технічного діагностування, які застосовані для розробки тестових та функціональних засобів вбудованого діагностування. Оцінки ефективності розроблених методів здійснені на основі комп'ютерних експериментів і аналізу даних, отриманих в лабораторних

і виробничих умовах.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в розробці і обґрунтуванні методів, моделей та алгоритмів синтезу легко тестуємих модулів ПЛК, програмно-апаратних засобів тестового і функціонального діагностування несправностей ПЛК і відновлення його працездатності. Зокрема:

1. Вперше розроблено метод синдромно тестуємих модулів ПЛК, що передбачає реалізацію логічних функцій частково однорідною схемою і перевірку справності модуля шляхом підрахунку двох спектральних коефіцієнтів Уолша синдромної функції модуля, що дозволяє знайти 100% одиночних константних несправностей внутрішніх вузлів модуля і кратні несправності первинних входів.

2. Отримав подальший розвиток метод синтезу генераторів псевдовичерпних тестів на зсувних регістрах з лінійним зворотним зв'язком (ЗРЛЗЗ/ЗР), заснований на обчисленні лінійно незалежних залишків і заміні елементів пам'яті ЗР на логічні елементи XOR, що знижує апаратні витрати на реалізацію схем генераторів.

3. Вперше розроблено метод синтезу генераторів псевдовипадкових тестових послідовностей на зсувних регістрах з деревовидною схемою зворотного зв'язку (ЗРДЗЗ), що забезпечує властивість синдромної тестуємості генераторних модулів.

4. Вперше розроблено методи синтезу генераторів детермінованих тестових послідовностей на ЗРДЗЗ, ЗРЛЗЗ і мережі клітинних автоматів (МКА) з використанням перетворювачів тестових векторів, які забезпечують більш економну реалізацію генераторних модулів.

5. Вперше розроблено метод синтезу модулів сигнатурного моніторингу, що самоперевіряються, на ЗРДЗЗ шляхом використання нелінійної частини модуля, додаткових елементів пам'яті і логічних елементів XOR для генерації функції парності модуля.

6. Отримав подальший розвиток метод діагностування БПЛК на системному рівні шляхом використання графових діагностичних моделей Препарата–Меца–Чена. Визначені необхідні і достатні умови  $t/t_p - S$  діагностуємості системи з  $t$  несправними модулями, в числі яких  $t_p$  модулів з ПН і  $S$  несправних інтерфейсних зв'язків. Визначена оптимальна  $t/t_p - S$  діагностуєма структура БПЛК, що має мінімальне число міжмодульних зв'язків і мінімальний час тестування.

7. Вдосконалено метод функціонального діагностування ПЛК з використанням синдромно тестуємого діагностичного процесора, який перевіряє правильність виконання сегментів управляючої програми шляхом порівняння реальних і еталонних сигнатур і виконує відновлення працездатності ПЛК при появі ПН і збоїв, шляхом повторної “прокрутки” сегментів програми, що дозволяє підвищити відмовостійкість ПЛК для класу найвірогідніших дефектів при мінімальних апаратних витратах.

**Практичне значення отриманих результатів обумовлено:**

1. Розробкою методів синтезу легко тестуємих і самоперевіряємих модулів сиг-

натурного моніторингу для тестового та функціонального діагностування систем управління на основі ПЛК.

2. Виключенням необхідності виконання трудомістких процедур генерації перевіряючих тестів і моделювання несправностей для мети технічного обслуговування ПЛК.

3. Підвищенням достовірності процедур тестового та функціонального діагностування ПЛК і зниженням часу технічного обслуговування систем управління.

4. Підвищенням ефективності і продуктивності систем управління на основі ПЛК завдяки можливості відновлення працездатності ПЛК вбудованими засобами діагностування.

5. Упровадженням інженерних методів проектування модулів ПЛК з вбудованими засобами діагностування, моделей, алгоритмів та програмних засобів в навчальний і технологічний процеси.

Розроблені методи синтезу ПЛК з вбудованими засобами тестового та функціонального діагностування знайшли практичне застосування на промислових установках типу «РОСТ» в Інституті Сциндіяційних Матеріалів НАН України (м. Харків), в розробках програмно апаратних діагностичних засобів Автоматизованої системи радіаційного контролю газоаерозольних викидів через вентиляційні труби енергоблоків АЕС України (ТОВ «ІНЕК» м. Харків), в навчальному процесі на кафедрі автоматики та управління в технічних системах НТУ «ХП».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати роботи, які винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них запропоновані: нові методи та алгоритми синтезу синдромно тестуємих модулів БПЛК і арифметичних пристроїв; вбудованих засобів тестового та функціонального діагностування, генераторів псевдовичерпаних, псевдовипадкових і детермінованих тестів, синдромно-сигнатурних аналізаторів на ЗРЛЗЗ, ЗРДЗЗ, МКА, які також легко тестуються і самоперевіряються; метод синтезу генераторів детермінованих тестів для цифрових пристроїв з скануванням даних з використанням перетворювачів тестових векторів; діагностичні моделі БПЛК, на основі яких розроблена процедура організації умовних діагностичних експериментів.

Вся практична робота з розробки схем модулів сигнатурного моніторингу та функціональних модулів ПЛК на ПЛІС ALTERA MAX 7000S та їх моделювання виконана здобувачем особисто, а роботи з впровадженням цих методів, пристроїв на підприємствах при його особистій участі.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення і результати роботи обговорювалися на семінарах кафедри автоматики і управління в технічних системах Національного технічного університету «ХП»; на наукових конференціях і семінарах: Міжнародна конференція EWDTС`03 (Алушта, 2003 р.); XII, XIII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2004 р., 2005 р.); 18-а Міжнародна конферен-

ція «Перспективні системи управління на з/д, промислового і міському транспорті» (Алушта, 2005 р.); V Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатики і моделювання» (Харків, 2005 р.).

**Публікації.** Результати наукових досліджень відображені в 15 статтях, опублікованих у фахових виданнях ВАК України.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури і додатків. Повний обсяг дисертації складає 238 сторінок; 46 ілюстрацій по тексту; 11 ілюстрацій на 9 сторінках; 27 таблиць по тексту; 6 додатків на 46 сторінках; 172 використаних джерела на 15 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрита актуальність теми дисертаційної роботи, формулюється мета і задачі дослідження, приводяться наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, стисло характеризується зміст дисертації.

**Перший розділ** присвячений дослідженню загальних принципів функціонування ПЛК, типових архітектурно-структурних модулів і технологічних основ проектування ПЛК промислового призначення на сучасній мікроелементній базі. Проведений аналіз особливостей функціональної і структурної організації ПЛК послідовної і паралельної дії, методів і засобів підвищення відмовостійкості і надійності функціонування ПЛК у виробничих умовах.

Відзначено, що в основі структурної організації ПЛК використовується типова структура мікропроцесорного пристрою управління, розширена модулями зв'язку з керованими об'єктами з кількістю входів – виходів 1024 і більш, а також пристроєм програмування, відладки і діагностування управляючих програм. Модулі зв'язку з керованим об'єктом є наборами модулів введення/виведення дискретних і аналогових сигналів. Основною особливістю ПЛК є циклічність функціонування і послідовність виконання основних операцій: опит і запис вхідних даних; рішення множини логічних рівнянь відповідно до управляючої програми ПЛК; формування управляючих команд на виходах ПЛК, скидання таймерів, лічильників і внутрішніх операторів управляючої програми.

Аналізуються основні методи і засоби підвищення відмовостійкості ПЛК шляхом введення апаратної, програмної і тимчасової надмірності. Обґрунтована ефективність застосування вбудованих функціональних і тестових програмно – апаратних засобів діагностування і відновлення працездатності БПЛК.

Відзначено, що на структурно–логічному рівні діагностування цифрових пристроїв широко використовуються методи компактного псевдовипадкового і псевдовичерпного тестування. Аналізується ідея поєднання концепції вбудованого самотестування і стандарту проектування IEEE 1449.1 «Граничне сканування». Аналіз діагностичного забезпечення мікропроцесорних СБІС провідних зарубіжних фірм показує, що 5-8% площі кристала займають вбудовані засоби діагностування, які мо-

жуть бути використаний для підвищення надійності і відмовостійкості БПЛК.

При генерації детермінованих тестів основна проблема пов'язана з трудомісткістю їх генерації і моделюванням несправностей для класу послідовних схем і комбінаційних схем великої розмірності. Методи тестопригодного проектування цифрових пристроїв і систем, що передбачають сканування внутрішніх елементів пам'яті в режимі тестування і розбиття складних схем на макроблоки, практично зводять проблему перевірки справності послідовної схеми до тестування її логічного ядра.

Розділ завершується обґрунтуванням і формулюванням мети і задач дисертаційної роботи.

**Другий розділ** присвячений розробці методів синтезу паралельних ПЛК з вбудованими засобами функціонального і тестового діагностування на поведінковому і системному рівні. Для виявлення найвірогіднішого класу нестійких несправностей пропонується використовувати вбудовані на кристал або печатну плату сторожові або діагностичні процесори (ДП), що виконують функцію сигнатурного моніторингу правильності виконання управляючих програм і відновлення працездатності шляхом повторної «прокрутки» програмного сегменту. Відзначено, що цей підхід є розвитком методу спостерігачів Люєнбергера, для реалізації якого розв'язується три задачі: розбиття управляючих програм ПЛК на сегменти; обчислення еталонних сигнатур сегментів, що є алгебраїчними інваріантами, які зберігаються в пам'яті ДП; контроль правильності виконання сегментів програм і відновлення працездатності у разі появи помилки. Алгебраїчними інваріантами сегментів управляючих програм є контрольні суми мікрокоманд, адреси дозволених переходів галужень і час виконання сегментів програм. Розроблений алгоритм взаємодії ДП і ПЛК. Для обчислення точок повернення запропоновано використовувати графову модель управляючої програми ПЛК, де вершини – сегменти програми, а дуги – дозволені переходи між сегментами. Обґрунтована структура ДП, що включає регістри, лічильники – таймери, синдромно – сигнатурні аналізатори, генератори еталонних сигнатур, схеми управління, які вбудовані в структуру ПЛК.

Для організації діагностичних експериментів в паралельних ПЛК, що складаються з  $n$  процесорних модулів, представлених множиною  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$  і кожний модуль  $m_i \in M$  має тестові інтерфейсні зв'язки (ТІС) з деякою підмножиною  $M$ , запропоновано використовувати графову ПМЧ модель системи. Якщо процесор  $m_i$  тестує  $m_j$  через ТІС, то з кожною вершиною  $m_i \in M$  графа  $G(M, A)$ , де  $A$  – множина дуг, зв'язані відображення  $\Gamma(m_i) = \{m_j: (m_i, m_j) \in A\}$  і  $\Gamma^{-1}(m_i) = \{m_j: (m_j, m_i) \in A\}$ , де  $a_{ij} \in A$  – дуга, що сполучає вершини  $m_i, m_j$ .

Результати тестування системи представляються діагностичним синдромом або розміткою дуг її графової моделі. Передбачається, що в системі з  $n$  модулів може бути  $t$  несправних, з яких  $t_p$  модулів мають нестійкі несправності, крім того допускається, що в системі присутні  $S$  несправних ТІС. Такі БПЛК є  $t/t_p - S$  діагностуємими,



якщо існує діагностичний експеримент, що знаходить ці несправності.

Діагностична процедура виявлення перемезаючих несправностей і збоїв в ПЛК передбачає багатократний прикладення перевіряючих тестів, що приводить до модифікації діагностичного синдрому системи.

*Визначення 1.* Хай в системі з  $M$  модулів існує  $F \subseteq M$ ,  $|F| \leq t$  несправних модулів. Синдром, що дозволяє знайти  $F$  несправних модулів системи за умови  $t/(t_p=0)$ , називатимемо  $k$  - сумісним, а множина несправних модулів  $F$  -  $k$  - сумісною множиною несправностей.

*Визначення 2.* Система є  $t/t_p-S$  - діагностуємою, якщо при заданому  $t/t_p$  - обмеженні для кожного  $k$  - сумісного синдрому множини несправних модулів  $k$  - сумісно за умови, що не більш  $S$  результатів тестування помилкові.

Приведене нижче твердження дозволяє визначити характеристики  $t/t_p - S$  - діагностуємості ПЛК.

Хай множина модулів  $X \subseteq M$  має відображення  $\Gamma(X) = \bigcup_{m_i \in X} (\Gamma(m_i) - X) \cdot \Psi(X, k)$  - позначає множину з  $k$  модулів в  $(M-X)$ , які мають найбільше число ТІС з модулями множини  $\{X\}$ .

*Твердження 1.* Система є  $t/t_p - S$  - діагностуємою тоді і тільки тоді, коли виконуються наступні умови:

$$1) |\Gamma^{-1}(m_i)| \geq t + S, \forall m_i \in M;$$

2) для кожного цілого числа  $q$ ,  $0 \leq q \leq t$ , і для кожної підмножини  $X \subseteq M$ ,  $|X| = n - 2t + q$ ,  $\Psi[X, \min(t, t_p + q)] > S$ .

Відповідно до *твердження 1* система є  $t/t_p - S$  - діагностуємою, якщо кожний модуль системи перевіряється, щонайменше,  $(t+S)$  іншими модулями.

Твердження 1 дозволяє визначити оптимальність структури  $t/t_p - S$  - діагностуємості мікропроцесорних ПЛК.

*Визначення 3.* Система  $M$  з  $n$  процесорних модулів є оптимально  $t/t_p - S$  - діагностуємою, якщо кожний модуль  $m_i \in M$  перевіряється  $k$  модулями і аналізується:

1)  $k = (t + s + 1)$  синдромів для випадку  $t/t_p - S$  - діагностуємості;

2)  $k = (t + s)$  синдромів для випадку  $t/(t_p=0) - S$  - діагностуємості.

Перший випадок відповідає організації діагностичного експерименту, що дозволяє знайти  $t$  несправних модулів, серед яких  $t_p$  модулів містять перемезаючі несправності і  $S$  несправних ТІС; в другому випадку -  $t$  несправних модулів з константними несправностями і  $S$  несправних ТІС в системі.

*Приклад 1.* Синтез структури ПЛК, що складається з  $n = 5$  процесорних самотестуємих модулів, яка є  $(t_p = 1), (S = 1)$  - діагностуємою (рис.1).

Відповідно до визначення 1 і 2, кожний модуль системи повинен перевірятися вбудованими засобами самотестування та двома іншими модулями.

Властивість самотестуємості процесорних модулів відображається циклами у вершинах ПМЧ моделі рис.1, що для  $t/t_p - S$  - діагностуємої системи з тими ж

характеристиками діагностуємості дозволяє скоротити число міжмодульних зв'язків на  $n$  і час виконання процедури діагностування. Показано, що процедура діагностування перетворюється на умовний діагностичний експеримент.

**Третій розділ** присвячений розробці методів синтезу синдромно тестуємих модулів ПЛК. Аналіз структурної організації паралельних ПЛК промислового застосування показує, що основу ПЛК складають блоки пам'яті (БП), лічильники вибірки управляючих команд і переходів, логічні схеми управління і порівняння, які належать класу багатовихідних комбінаційних схем (БКС), реалізовуваних на ПЛІС типу CPLD або FPGA. Обґрунтована ефективність використання методів псевдовичерпного і псевдовипадкового тестування логічних модулів ПЛК.

*Визначення 1.* Синдромом логічної функції  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  називається число  $S = K/2^n$  де  $k$  – число мінтермів функції.

*Визначення 2.* Логічна функція  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  називається позитивно (негативно) однорідною по вхідній змінній  $x_i$ , якщо існує мінімальна диз'юнктивна (кон'юнктивна) нормальна форма, в якій  $x_i$  з'являється тільки без інверсії (із інверсією).

*Визначення 3.* Логічна схема є частково однорідною, якщо вона однорідна по всіх внутрішніх з'єднаннях і неоднорідна щонайменше по одному первинному входу.

Показано, що якщо схема реалізуюча функцію  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  є частково однорідною, то несправності константного типу довільної кратності на вхідних полюсах схеми і одиночні константні несправності на всіх її внутрішніх з'єднаннях виявляються шляхом перевірки двох спектральних коефіцієнтів функції  $f$  – синдромів  $r_0$  і  $r_\alpha$ , де  $r_0$  – число одиничних значень функції,  $r_\alpha$  – спектральний коефіцієнт Уолша, що характеризує міру кореляції функції  $f$  з сумою по mod2 всіх змінних  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Для тестового діагностування БКС з  $n$  входами і  $m$  виходами  $f_1, f_2, \dots, f_m$  запропонований метод паралельного синдромного тестування шляхом додатку повного тривіального тесту до входу схеми, підрахунку коефіцієнтів  $r_0$  і  $r_\alpha$  в синдромній функції  $f_c = f_1 \oplus f_2 \oplus \dots \oplus f_m$  і порівняння значень  $r_0, r_\alpha$  з еталонними значеннями справної схеми (рис.2).

Перевірка справності БКС здійснюється в двох режимах, при значеннях управляючого входу:  $U=0$  – визначення  $r_0$ ;  $U=1$  – визначення  $r_\alpha$ .

Рис.2 Діагностування БКС методом паралельного синдромного тестування: (n-Cr) –  $n$  розрядний двійковий лічильник, СС – схема порівняння, ЕС – еталонна сигнатура.

За наявності в БКС внутрішніх вершин  $e_i$  з розгалуженнями (ВР), від яких залежать два і більш вихідних полюсів, несправність в  $e_i$  не виявляється перевіркою синдромної функції  $f_c$ , якщо на виходах  $f_1, f_2, \dots, f_m$  з'являються однорідні помилки типу  $01 \leftrightarrow 10$  або  $00 \leftrightarrow 11$  парної кратності.

Якщо існує шлях від ВР «е» до вихідного полюса  $f$  в частково однорідній схе-

мі, то відповідно до Визначення 3 значення  $e$  з'являється на виході  $f$  або з інверсією, або без неї. Це дозволяє представити  $f(x)$  у вигляді:  $f(e, x) = A(x) e^u + C(x)$ , де  $A(x)$ ,  $C(x)$  – функції, не залежні від  $e$ ,  $e^u \in \{e, \bar{e}\}$ .

*Теорема 1.* Хай  $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$  і  $f_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$  булеві функції, які реалізовані БКС і залежні від ВР  $e$ :  $f_1 = A_1 e^u + C_1$  и  $f_2 = A_2 e^u + C_2$ . Несправність в  $e$  виявляється синдромом  $|f_c| = |f_1 \oplus f_2|$  тоді і тільки тоді, коли  $\frac{\partial f_1}{\partial e} \neq \frac{\partial f_2}{\partial e}$  и  $|C_1 \oplus C_2| \neq 2^{n-1}$ .

Теорема 1 визначає необхідні і достатні умови синдромної тестуємості БКС по спектральних коефіцієнтах синдромної функції  $f_c$ .

Для виключення процедури аналізу БКС з метою визначення властивості її часткової однорідності і синдромної тестуємості запропоновано метод синтезу логічних функцій деревовидними схемами на елементах AND, OR, NOT, XOR.

Розроблено метод і алгоритм синтезу КС деревовидними схемами з логічних елементів AND, OR, XOR.

Оскільки не кожна ЛФ може бути реалізована одновимірною мережею (ОМ), то в загальному випадку довільну ЛФ  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  можна представити у вигляді:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + \dots + \varphi_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

де  $\varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – ЛФ, реалізовані ОМ і необов'язково залежні від всіх  $n$  змінних.

*Твердження 1.* Хай задана ЛФ  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Якщо число мінтермов ЛФ  $k < 2^{n-1}$  і в мінтермній матриці існує щонайменше один стовпець  $x_i$ , у якого  $q_i = k$  або  $q_i = 0$ , то крайнім правим елементом ОМ, що реалізовує задану ЛФ, є елемент AND.

*Твердження 2.* Хай задана ЛФ  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Якщо число мінтермов ЛФ  $k > 2^{n-1}$  і в мінтермній матриці існує щонайменше один стовпець  $x_i$ , у якого  $q_i = 2^{n-1}$  або  $q_i = k - 2^{n-1}$ , то крайнім правим елементом ОМ, що реалізовує задану ЛФ, є елемент OR.

*Твердження 3.* Якщо число мінтермов ЛФ  $k = 2^{n-1}$  і в мінтермній матриці знайдеться щонайменше один стовпець  $x_i$ , викреслювання якого приводить до мінтермній матриці розмірності  $k \times (n - 1)$  з  $2^{n-1}$  різними рядками, то крайнім правим елементом ОМ є елемент XOR.

На основі цих тверджень побудований алгоритм синтезу одновимірних мереж з логічних елементів, який встановлений в основу алгоритму синтезу довільною КС деревовидною схемою.

*Алгоритм 1* синтезу деревовидних КС.

Крок 1. Перевірити реалізуємість заданої ЛФ  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  одновимірною ме-

режою. Якщо  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  реалізується ОМ, перейти до кроку 4. В іншому випадку до кроку 2.

Крок 2. Знайти всі прості імпліканти, що входять в МДНФ ЛФ.

Крок 3. Формувати функції  $\varphi_i$  шляхом знаходження підмножин простих імплікант ЛФ і перевірити умови реалізуємості  $\varphi_i$  ОМ. Якщо  $\bigcup_{i=1}^N \varphi_i$  включає всі прості імпліканти ЛФ, то перейти до кроку 5. В іншому випадку, повторити крок 3.

Крок 4. Побудувати ОМ, що реалізує  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Крок 5. Побудувати деревовидну схему відповідно до виразу 1, реалізуючу ЛФ  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Обгрунтовано і розроблено метод синтезу легко тестуємих деревовидних схем в базисі поліноміальних нормальних форм (ПНФ) з фіксованою полярністю змінних, який забезпечує мінімальність витрат на їх реалізацію.

Такий клас схем є синдромно тестуємим і може тестуватися універсальними детермінованими тестами які знаходять 100% одиночних константних несправностей. На основі запропонованого методу розроблено алгоритм синтезу логічних схем, що реалізують мінімальну ПНФ функції з фіксованою полярністю змінних. Розроблена процедура обчислення коефіцієнтів ПНФ функції «n» змінних і пошуку її мінімальних форм, яка дозволяє в n раз скоротити число операцій складання по mod2 і вимагає для програмної реалізації менший об'єм пам'яті.

**Четвертий розділ** присвячений розробці методів синтезу генераторів тестових послідовностей (ГТП) і синдромно – сигнатурних аналізаторів, які відповідають стандартам тестопригодного проектування і вимогам до апаратних витрат на вбудовані засоби тестового діагностування. Проведено аналіз методів проектування генераторів псевдовипадкових і псевдовичерпних тестових послідовностей на зсувних регістрах з лінійними і нелінійними зворотними зв'язками (ЗРЛЗЗ, ЗРНЗЗ) і МКА. Обгрунтовані переваги ГТП на ЗРНЗЗ і МКА, завдяки їх можливостям генерувати множину детермінованих тестів.

Показано, що для синтезу генераторів псевдовипадкових послідовностей ГТП на ЗРНЗЗ або послідовностей Де Брейна, необхідно вирішити задачу знаходження остовних дерев в графі  $G_{n-1}$ , (n-1) розрядного ЗР, які породжують гамільтонові цикли в графі  $G_n$ , n розрядного ЗР з мінімальними апаратними витратами на реалізацію функцій зворотного зв'язку ЗР. Оскільки гамільтонов цикл графа  $G_n$  є остовним деревом цього графа, то множина цих остовних дерев графа  $G_n$  використовується для породження гамільтонових циклів в графі  $G_{(n+1)}$ . Ітеративно застосовуючи цю процедуру, можна знайти обмежену множину остовних дерев для  $n \leq (32 \div 34)$ , задовольняючих вказаним вище властивостям.

Запропоновано метод перетворення остовного дерева в граф переходів кінцевого детермінованого автомата з числом станів, рівним числу вершин остовного дере-

ва. По автоматних моделях остовних дерев графа  $G_{n-1}$  можна знайти множину булевих функцій, які породжують Гамільтонови цикли в графі  $G_n$ ,  $n$  – розрядного ЗР.

Розроблено і реалізовано алгоритм синтезу таких булевих функцій. Для реалізації функцій зворотних зв'язків ЗР  $f_{oc}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  де  $x_i, i = \overline{1, n}$  – стан  $i$  – го тригера ЗР, запропоновано використовувати схемні реалізації  $f_{oc}$  деревовидними схемами, метод синтезу яких представлений в третьому розділі, що забезпечує синдромну тестуємість  $f_{oc}$ .

Оскільки функція  $f_{oc}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , що породжує Гамільтонов цикл в  $n$  – розрядному ЗР, дозволяє генерувати множину  $V_n$  всіх  $n$  – мірних двійкових векторів, то зсувні регістри з деревовидним ЗЗ (ЗРДЗЗ) можна використовувати як генератори детермінованих тестів, тестових послідовностей максимальної довжини, а також синдромних аналізаторів – лічильників числа  $1(0)$  вихідних послідовностей ЦП або лічильників числа переходів  $1 \rightarrow 0$  ( $0 \rightarrow 1$ ), тобто набір модулів сигнатурного моніторингу вбудованого тестового та функціонального діагностування.

Найпростішим підходом до побудови модулів сигнатурного моніторингу, що самоперевіряються, є контроль паритетності вихідних послідовностей. Приведене нижче твердження показує, що існує простий метод генерації паритетної функції для модулів на ЗРНЗЗ.

*Теорема 1* Хай в ЗР з  $k$  розрядами  $(S_1, S_2, \dots, S_k)$  нелінійний зворотний зв'язок, що породжує гамільтонов цикл в ЗР, утворена функцією збудження тригера  $S_1$  у вигляді  $S_1(t+1) = S_k(t) \oplus f(S_1, S_2, \dots, S_{k-1})$ , де  $f(S_1, S_2, \dots, S_{k-1})$  – нелінійна булева функція.

Якщо функцію збудження розряду  $S_{(k+1)}$  ланцюга ЗРНЗЗ сформувавши у вигляді  $S_{k+1}(t+1) = S_{k+1}(t) \oplus f(S_1, S_2, \dots, S_{k-1})$ , то розряд  $S_{(k+1)}$  генерує паритетну функцію парності з розрядами  $(S_1, S_2, \dots, S_k)$ .

Приклад реалізації самоперевіряемого генератора тестів наведений на рис.3.

Контроль правильності функціонування генератора тестових послідовностей може здійснюватися шляхом аналізу функцій:  $f_1 = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3, f_2 = x_4 \oplus \bar{x}_5$

Запропоновано метод побудови генераторів тестів для послідовносних схем сканування, заснований на використанні генераторів гамільтонових циклів на ЗРНЗЗ або ЗРЛЗЗ і найпростіших перетворювачів тестових векторів, що формують задану множину ДТ.

Рис. 3 Схема самоперевіряемого генератора тестів на ЗРНЗЗ  $f(x) = x_4 \oplus \overline{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3}$

Основна ідея запропонованого підходу демонструється на прикладі стандартної схеми S27 ( ISCAS-89 ). Перевірка справності схеми здійснюється в два етапи. На першому – подається множина тестів, формованих генератором псевдовипадкових послідовностей. На другому етапі формується множина тестів за допомогою перетворювача векторів, які покривають несправності, що не знаходяться тестами на першому етапі.

Розроблено метод синтезу псевдовипадкових і детермінованих тестів на мережах клітинних автоматів, які легко реалізуються апаратно на ПЛІС типу FPGA і CPLD.

*Визначення 1.* МКА всі клітки якої набудовані одним і тим же правилом, називається однорідною МКА, в іншому випадку МКА називається гібридною.

*Визначення 2.* Однорідна або гібридна МКА називається адитивною, якщо правила настройки кліток є класом лінійних функцій.

Показано що адитивні правила настройки КА дозволяють генерувати послідовності різної довжини залежно від початкових станів кліток і граничних умов. Для аналізу поведінки гібридних МКА запропоновано використовувати матричну модель її структури.

*Визначення 3.* Квадратна матриця розмірності  $L \times L$ , що представляє правила настройки мережі клітинних автоматів, називається характеристичною матрицею МКА, в якій  $i$ -й рядок матриці визначен правилом настройки  $i$ -го клітинного автомата.

Характеристична матриця МКА (надалі  $T$  – матриця) дозволяє представити функцію переходів автоматної моделі адитивної мережі клітинних автоматів у вигляді:

$$\begin{cases} [f_{t+1}(X)] = [T][f_t(X)], \\ \dots \\ [f_{t+n}(X)] = [T]^n[f_t(X)]. \end{cases}$$

де  $f_t(X)$  – стан МКА у момент часу  $t$ , а  $f_{t+1}(X)$  – стан МКА у момент часу  $(t+1)$ .

На основі матричних моделей розроблено метод синтезу структур МКА з певними правилами настройки, які генерують послідовності максимальної довжини. Розроблений алгоритм і програма, яка обчислює правила еволюції МКА для генерації послідовностей максимальної довжини.

Запропоновано метод синтезу генераторів детермінованих тестів і на його основі розроблено алгоритм, що дозволяє обчислити правила настройки МКА для генерації субпослідовностей з мінімальним числом настройок і покриваючих задану множину детермінованих тестів.

**П'ятий розділ** присвячений експериментальним дослідженням типових модулів сигнатурного моніторингу БПЛК, реалізованих на ПЛІС ALTERA MAX 7000S і моделюванню арифметичного модуля паралельного помножувача з вбудованими генераторами тестів на ЗРДЗЗ.

На мові VHDL були описані наступні схеми:

- генератор псевдовипадкових послідовностей на ЗРДЗЗ ( $n = 16$ );
- самоперевіряємий багатоканальний сигнатурний аналізатор з породжувачем многочленом  $X^{16} \oplus X^{12} \oplus X^9 \oplus X^7 + 1$ ;
- генератор псевдовипадкової послідовності на основі САК ( $n = 12$ ).

Комп'ютерні експерименти проводилися за допомогою програми моделювання

## MAX PLUS II.

Представлена структура паралельного помножувача  $N_x \times N_y$  з вбудованими генераторами псевдовичерпного тестування на ЗРНЗЗ. Клітка структури помножувача складається з повного однорозрядного суматора, схеми «AND» і має 4 входи. Тому прикладення  $2^4$  двійкових наборів до входів кожної клітки забезпечує повну перевірку її таблиці істинності. В якості псевдовичерпного тест запропоновано використовувати регулярні і повторюючіся чотирьохрозрядні набори на входах  $N_x$  і  $N_y$ . Таким чином, на входи операндів  $N_x$  і  $N_y$  подається 16 тестових наборів, які створюють 256 тестових комбінацій для довільних значень розмірностей операндів. Для перевірки виконання умов транспортування несправностей на спостережувані виходи помножувача використовувалися їх моделі на мові VHDL. Моделювалося покриття класу константних несправностей вузлів помножувачів. Аналіз результатів моделювання показує, що для розглянутих структур паралельних помножувачів відсутність 100% покриття несправностей обумовлена обмеженням рівня керованості окремих внутрішніх кліток помножувача. Для формування сигнатури в схемі помножувача використовується акумулятор результатів множення у вигляді суматора з крізним перенесенням. Аналіз витрат на вбудовані схеми тестового діагностування  $P_{затр}$  у відсотках від числа елементів основної функціональної схеми дає наступні результати: для  $N_x = N_y = 16, 32, 64$ , маємо  $P_{затр} = 5,7\%; 2,25\%; 0,96\%$  - відповідно.

**В додатках** представлені програми моделювання лічильникових структур, помножувачів на мові VHDL; генераторів детермінованих тестів на VKA (мова програмування DELPHI 7); акти, підтверджуючі упровадження результатів дисертаційної роботи.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

Підсумком дисертаційної роботи з'явилося рішення науково-практичної задачі підвищення відмовостійкості систем управління складними промисловими об'єктами на основі паралельних багатопроцесорних ПЛК з вбудованими засобами діагностування працездатності БПЛК.

Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. Проведено аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку типових структур ПЛК, особливостей їх функціонування як управляючих пристроїв промислового призначення. Аналіз показав недоліки існуючих засобів діагностування: трудомісткість тестопригодного проектування, довжина технічного обслуговування існуючих пристроїв, дозволив обґрунтувати мету і задачі дослідження дисертаційної роботи.

2. Обґрунтовано і розроблено метод синтезу діагностичного забезпечення БПЛК на основі концепції сигнатурного моніторингу з використанням уніфікованих вбудованих програмно-апаратних модулів, що здійснюють функціональне і тестове діагностування управляючих пристроїв на поведінковому і структурно-логічному рівнях.

3. Запропоновано на системному рівні організації тестового діагностування БПЛК використовувати графові діагностичні моделі Препарата-Метца-Чена. Визначені необхідні і достатні умови  $t/t_p-S$  – діагностуємості системи з  $n$  модулів з  $t$  несправними, в числі яких  $t_p$  модулів мають перемежаючи несправності і  $S$  несправних інтерфейсних зв'язків. На підставі цих умов визначена оптимальна  $t/t_p-S$  – діагностуєма структура БПЛК, що має мінімальне число міжмодульних зв'язків і мінімальний час тестування.

4. Розроблено метод функціонального діагностування БПЛК із застосуванням діагностичного процесора. Запропонована структура ДП, що функціонує паралельно з управляючим процесором. В процесі функціонування ДП перевіряє правильність виконання сегментів управляючої програми шляхом порівняння реальних і еталонних синдромів і сигнатур, здійснює відновлення працездатності ПЛК при появі перемежаючи несправностей шляхом повторної «прокрутки» сегментів програми, що дозволило підвищити відмовостійкість системи управління для класу найвірогідніших дефектів з мінімальними апаратними витратами в порівнянні з  $N$  – ірованими сегментами.

5. Розроблено метод синтезу синдромно тестуємих модулів ПЛК, заснований на процедурі аналізу їх приналежності до класу частково-однорідних схем. Розроблений метод і на його основі алгоритм синтезу синдромно тестуємих деревовидних схем. Розроблений метод синтезу використовувався при розробці і створенні логічних і арифметичних модулів ПЛК з паралельною архітектурою, а також уніфікованих модулів сигнатурного моніторингу, що дозволяє спростити процедури технічного обслуговування як модулів БПЛК, так і вбудованих засобів тестового і функціонального діагностування.

6. Розроблені методи синтезу легко тестуємих і самоперевіряємих модулів сигнатурного моніторингу таймерів-лічильників, генераторів тестів і еталонних сигнатур, сигнатурних і синдромних аналізаторів, на основі ЗРЛЗЗ, ЗРДЗЗ і МКА, застосування яких дозволило спростити схемну реалізацію вбудованих програмно-технічних засобів тестового та функціонального діагностування БПЛК на ПЛІС і спростити процедури перевірки справності цих модулів.

7. Застосування розроблених методів синтезу БПЛК з вбудованими засобами функціонального і тестового діагностування дозволило створити новий клас високо-ефективних систем управління. Результати роботи впроваджені на установках «РОСТ» на дослідному виробництві ІСМА НАН Україна (м. Харків), у автоматизованій системі радіаційного контролю газоаерозольних викидів через вентиляційні труби АЕС (ТОВ «ІНЕК» м. Харків), та навчальний процес кафедри автоматики і управління в технічних системах НТУ «ХП».

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Дербунович Л.В., Соболев А.В., Татаренко Д.А. Параллельные умножители



со встроенной схемой самотестирования // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – Вип. 7, т. 3 – с. 55 – 60.

Здобувачем розроблено метод вбудованого псевдовичерпаного діагностування паралельних множителей з застосуванням чотирьохрозрядних генераторів повних циклів на зсувних регістрах з деревоподібним зворотнім зв'язком.

2. Derbunovich L., Suzdal V., Sobolev A., Tatarenko D. Test pattern generators for pseudo - exhaustive testing. // RADIOELECTRONICS & INFORMATICS. – Харків: ХНУРЕ, – 2003 . №3(24) p. 120.

Здобувачем запропоновано в процедурі синтезу генераторів псевдо вичерпаних тестів для тестування  $(n, m, k)$  схем метод аналізу множин остатків для знаходження конусів з лінійно залежними остатками.

3. Дербунович Л.В., Горлов Ю.В., Татаренко Д.А. Генераторы тестов на клеточных автоматах для схем встроенного самотестирования // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – № 21 – с. 59 – 62.

Здобувачем обґрунтовано умови еволюцій мережі клітинних автоматів, яка відповідає завданій множині детермінованих тестів без застосування додаткової пам'яті.

4. Дербунович Л.В., Темников И.Н., Татаренко Д.А. Генераторы тестов для дискретных устройств с самотестированием // Информационно – управляющие системы на железнодорожном транспорте.– Харків: УкрГАЗТ.– 2004.– № 1(45)`.– с. 40 –45.

Здобувачем запропоновано, з метою зниження апаратних витрат, метод трансформування генератора тестів на ЗРЛЗЗ/ЗР для  $(n, m, k)$  схем в структуру, в якій елементи пам'яті, що не застосовані на входах перевіряємої схеми, змінюються елементами XOR.

5. Бережная М.А., Ковзель Н.О., Татаренко Д.А. Синтез синдромно тестируемых программируемых логических контролеров. Часть 1. Метод тестирования // Информационно – управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Харків: УкрГАЗТ.– 2004. – № 3(47)`.– с. 49 – 52.

Здобувачем запропоновано метод формування синдромної функції багато вихідної логічної схеми і обґрунтовані умови виявлення константних несправностей в частково однорідних схемах шляхом аналізу двох спектральних коефіцієнтів Уолша синдромної функції.

6. Дербунович Л.В., Суздаль В.С., Бережная М.А., Соболев А.В., Татаренко Д.А. Диагностические модели многопроцессорных систем управления // Информационно – управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Харків: УкрГАЗТ.– 2004. – № 6(50)`.– с. 33 – 37.

Здобувачем запропоновано графова ПМЧ модель багатопроцесорних ПЛК, в якій кожний процесор має вбудовані засоби само тестування, що забезпечує умови  $t/t_p - S$  діагностуємості БПЛК при зменшені числа між модульних зв'язків та часу діагностування.

7. Дербунович Л.В., Горлов Ю.В., Татаренко Д.А. Метод синтеза генераторов детерминированных тестов на сетях клеточных автоматах // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 17 – с. 59 – 62.

Здобувачем розроблено алгоритм розбивання заданої множини детермінованих тестів на підмножини, для яких вичислюються правила настроек мережі клітинних автоматів.

8. Дербунович Л.В., Клименко А.В., Татаренко Д.А. Тестирование последовательностных схем встроенными генераторами детерминированных тестов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 38 – с. 36 – 39.

Здобувачем проведено аналіз існуючих методів діагностування цифрових систем з скануванням елементів пам'яті і обґрунтована перевага генераторів детермінованих тестів на ЗРНЗЗ.

9. Дербунович Л.В., Татаренко Д.А. Клименко А.В. Генераторы детерминированных тестов на сдвиговых регистрах с нелинейной обратной связью // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 7 – с. 58 – 63.

Здобувачем запропоновано метод формування тестових послідовностей для цифрових пристроїв з скануванням елементів пам'яті шляхом застосування двох ЗРНЗЗ для сканування даних в елементах пам'яті і тестових послідовностей на входах перевіряємої схеми.

10. Бережная М.А., Ковзель Н.О., Татаренко Д.А. Синтез синдромно тестируемых программируемых логических контролеров. Часть 2. Примеры синтеза легко тестируемых схем // Информационно – управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Харьков: УкрГАЗТ.– 2005. – № 3(53)`. – с. 49 – 52.

Здобувачем запропоновано метод перетворення схем, що забезпечує їх синдромну тестуємость; приведено приклади застосування методу для проектування модулів ПЛК з паралельною архітектурою.

11. Бережная М.А., Рыжикова М.Г., Татаренко Д.А. Синтез комбинационных схем в базисе полиномиальных форм // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЭ – 2005. – № 3(32) – с. 103 – 109.

Здобувачем запропоновано метод і алгоритм знаходження мінімальних поліноміальних нормальних форм з фіксованою полярністю перемінних; аналіз трудомісткості запропонованого алгоритму.

12. Derbunovich L., Berezhyna M., Ryzhskova M., Tatarenko D. Pseudoexhaustive tpg based on nonlinear feedback shift registers // Информационно – управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Харьков: УкрГАЗТ.–2005.– № 5(55)`. – с. 54– 58.

Здобувачем запропоновано метод і алгоритм знаходження булевих функцій, що відроджують гамільтонові цикли в зсувному регістрі, шляхом перетворення перехо-

дів остовного графу ЗР в модуль кінцевого детермінованого автомату, на підставі якого формується гамільтонов цикл.

13. Либерг И.Г., Бовкун Д.Н., Татаренко Д.А. Программные средства моделирования неисправностей оперативной памяти. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 38 – с. 84 – 89.

Здобувачем запропоновано засоби моделювання несправностей оперативної пам'яті ПЛК і зроблено аналіз існуючих алгоритмів виявлення несправностей.

14. Дербунович Л.В., Бережная М.А., Рыжикова М.Г., Татаренко Д.А. Генераторы тестов для встроенного самотестирования дискретных устройств // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 56 – с. 3 – 8.

Здобувачем запропоновано метод синтезу перетворювача двоїчних векторів для генерації детермінованих тестів для перевірки справності послідовних схем з скануванням елементів пам'яті.

15. Татаренко Д.А. Самопроверяемые модули сигнатурного мониторинга // Информационно – управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Харьков: УкрГАЗТ. – 2007. – № 3(65)'. – с. 53 – 59.

## АНОТАЦІЇ

**Татаренко Д.А. Програмовані логічні контролери з вбудованими засобами тестового та функціонального діагностування. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – елементи та пристрої обчислювальної техніки та систем керування. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2007р.

Робота присвячена розробці моделей, методів і алгоритмів синтезу ПЛК, у яких процедури перевірки справності і встановлення працездатності здійснюються вбудованими засобами тестового та функціонального діагностування.

Запропоновані нові методи побудови діагностичних експериментів (ДЕ) в багатопроцесорних ПЛК (БПЛК) шляхом використання графових моделей Препарата-Меца-Чена (ПМЧ). Визначені необхідні та достатні умови  $t/t_p-S$  – діагностуємі системи що містить  $n$  модулів, з яких  $t$  несправних, у тому числі,  $t_p \leq t$  модулів мають перемежовані несправності (ПН) і  $S$  несправних тестових інтерфейсних зв'язків (ТІЗ). На підставі доведених тверджень визначається оптимальність структури  $t/t_p-S$  діагностуємих БПЛК. Розроблені графові моделі БПЛК із процесорними модулями, які самотестуються, що дозволяє на поведінковому рівні організувати умовні ДЕ для виявлення несправних процесорних модулів і ТІЗ. Розроблено нові ефективні методи синтезу синдромно тестуємих схем, на підставі яких виконується проектування лічильників адрес, таймерів, генераторів тестових послідовностей, синдромно-сигнатурних аналізаторів, арифметико-логічних пристроїв БПЛК.

Практична реалізація розроблених методів і алгоритмів в промисловому виробництві дозволили підвищити відмовостійкість систем управління, знизити витрати на технічне обслуговування пристроїв.

Ключові слова: засоби контролю і діагностування, програмовані логічні контролери, синдромне тестування, генератори псевдовичерпаних і псевдовипадкових послідовностей клітинних автоматів, зсувні регістри з деревовидними зворотними зв'язками.

**Татаренко Д.А. Программируемые логические контролеры с встроенными средствами тестового и функционального диагностирования. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – элементы и устройства вычислительной техники и систем управления. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2007 г.

Диссертация посвящена решению задачи обеспечения требуемого уровня надежности и отказоустойчивости устройств и систем управления динамическими объектами, построенных на основе использования современных программируемых логических контролеров (ПЛК) промышленного применения. Сформулированная цель достигается применением встроенных на кристалл или печатную плату программно-аппаратных средств тестового и функционального диагностирования многопроцессорных ПЛК (МПЛК) на системном, функционально-структурном и логическом уровнях. Предложено на системном уровне организации диагностических экспериментов (ДЭ) в МПЛК использовать графовые модели Препарата-Метца-Чена (ПМЧ), в которых в отличие от известных моделей предполагается использовать  $t$  модулей, в числе которых  $t_p$  имеют перемежающиеся неисправности (ПН), и  $S$  неисправных интерфейсных связей. На основании этих условий определена оптимальная  $t/t_p - S$  диагностируемая структура МПЛК, имеющая минимальное число межмодульных связей и минимальное время тестирования. Предложена графовая ПМЧ модель МПЛК с самотестируемыми процессорными модулями, применение которой позволило построить условный ДЭ и сократить время технического обслуживания МПЛК. Предложен и обоснован метод функционального диагностирования исправности МПЛК, который осуществляется диагностическим процессором (ДП), функционирующим параллельно с управляющим процессором. В качестве алгебраических инвариантов правильности функционирования ПЛК предложено использовать время выполнения сегментов управляющих программ, контрольные метки сегментов, адреса разрешенных ветвлений программы и контрольные суммы кодов микрокоманд. ДП осуществляет восстановление работоспособности ПЛК при появлении ПН и сбоях путем обратной “прокрутки” сегментов программы.

Обоснован и разработан метод синтеза синдромно тестируемых модулей ПЛК и встроенных средств диагностирования, в котором каждая логическая функция (ЛФ) реализуется частично однородной схемой. Показано, что в этом случае проверка ис-

правности многовыходных комбинационных схем (МКС) осуществляется псевдоисчерпывающим тестированием синдромной функции МКС, являющейся сверткой по  $\text{mod}2$  всех выходов МКС, путем подсчета двух спектральных коэффициентов Уолша синдромной функции, что позволяет обнаружить 100% одиночных константных неисправностей внутренних узлов МКС и кратные неисправности на ее первичных входах. Определены условия реализуемости произвольной ЛФ однородной сетью логических элементов, на основе которых предложен метод и разработан алгоритм синтеза легкотестируемых и самопроверяемых модулей сигнатурного мониторинга: генераторов псевдослучайных и псевдоисчерпывающих тестов на сдвиговых регистрах с линейной и нелинейной обратной связью (СРЛОС, СРНОС), на сетях клеточных автоматов (СКА), таймеров-счетчиков, синдромно-сигнатурных анализаторов, применение которых позволило упростить и унифицировать схемную реализацию встроенных программно-технических средств тестового и функционального диагностирования МПЛК и упростить процедуры проверки исправности этих модулей. Применение разработанных методов синтеза МПЛК с встроенными средствами функционального и тестового диагностирования позволило создать новый класс высокоэффективных систем управления: установками «РОСТ» на опытном производстве ИСМА НАН Украина (г.Харьков); повысить отказоустойчивость автоматизированной системы радиационного контроля газоаэрозольных выбросов через вентиляционные трубы АЭС. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры автоматики и управления в технических системах Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (г.Харьков)

Ключевые слова: многопроцессорные программируемые логические контроллеры, средства контроля и диагностики псевдослучайное и псевдоисчерпывающее тестирование, логическая функция, оптимизация, ПЛИС, ПМЧ модель, синдромное тестирование, СРЛОС, СРНОС, СКА.

**Tatarenko D.A. The programmable logical controllers based on built-in techniques of functional and hardware levels self-testing.**

This thesis is devoted to the development and implementation of the new models, methods and algorithms of synthesis signature monitoring units providing more effective diagnostic experiment (DE) in self-testing systems on chip and multiprocessor programmable logical controllers (MPLC). The main goal of these techniques is to minimize the cost of DE and improve the properties availability and fault-tolerance of MPLC using in industrial productions.

The new graph model of the, MPLC based on the known Preparata-Metze-Chien (PMC) model of multiprocessor systems is proposed. The model allows to construct compaction procedures of DE on system level to detect of faulty units and communication links. Synthesis method of multi-output easily testable combinational circuits based on analysis of their belonging to the class of the partially uniform circuits is proposed. It was been shown that tree-line circuits are belong to syndrome testable ones. The new hardware

efficient test pattern generators, counters, timers, syndrome-signature analyzers on shift registers with tree-line non-linear feedback is presented.

Practical implementation of the developed models, methods and algorithms for synthesis of easily testable units of the MPLC has allowed to boost fault tolerance control systems that has ensured the boosted quality level of a finished product of the factory-manufacturer.

Keywords: testable design, graph model, built-in self-testing, pseudoexhaustive test, syndrome-signature analyzer, non-linear feedback shift registers, tree-line circuits.