

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

ПАХОМОВ ЮРІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 681.326:519.714

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ТЕСТОПРИДАТНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
КРИТИЧНИХ СИСТЕМ ЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ
КІНЦЕВИХ АВТОМАТІВ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Мірошник Марина Анатоліївна,
Український державний університет залізничного транспорту, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Фурман Ілля Олександрович,
Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка МОН України, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій;

кандидат технічних наук, доцент
Куланов Віталій Олександрович,
Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» МОН України, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем.

Захист відбудеться «_____» _____ 2019 року о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.01 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Науки, 14.

Автореферат розісланий « _____ » _____ 2019 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Є. І. Литвинова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Критичні технічні системи, тобто такі, у яких відмови можуть призвести до значних економічних втрат, фізичних руйнувань або загроз життю людей, вимагають особливої уваги щодо надійності їх функціонування. Для підвищення надійності критичних систем, якості технічного обслуговування, продуктивності праці технічного персоналу і своєчасного виявлення відмов, використовуються системи контролю й діагностики.

Апаратні критичні системи, які застосовуються в електроенергетиці та газопостачанні, характеризуються тим, що при проведенні регламентних робіт щодо технічного обслуговування їх зупинка на тривалий час для проведення діагностування неможлива, а функціональне діагностування є дуже витратним. Виходячи з цього для діагностування апаратних критичних систем використовуються вбудовані системи контролю та діагностики.

У критичних системах енерго- та газопостачання широко використовуються спеціальні локальні системи логічного управління й регулювання на основі композиції керуючого та операційного автоматів, які розташовані на технологічно відокремлених об'єктах. Для контролю автоматних систем логічного управління доцільно використовувати або апаратні системи, які імітують алгоритм управління чи діагностування, або методи тестопридатного проектування, які перетворюють керуючі автомати на легкотестовані, тобто такі, у яких витрати на проведення діагностичного експерименту є мінімальними за довжиною та часом. При проектуванні систем логічного управління на технологічній платформі ПЛІС з використанням САПР на основі мов опису апаратури вбудовані системи діагностування або апаратні засоби підвищення тестопридатності доцільно вводити ще на етапі проектування, тобто на етапі побудови моделей мовами опису апаратури.

Таким чином, актуальним і важливим науко-технічним завданням є розробка моделей і методів автоматизованого проектування та діагностування тестопридатних цифрових систем логічного управління на основі кінцевих автоматів.

Значний внесок у вирішення проблем тестопридатного проектування та діагностування цифрових систем на основі кінцевих автоматів внесли провідні вітчизняні й зарубіжні вчені: А.П. Горяшко, Є.С. Согомонян, В.Г. Тоценко, Д.В. Сперанський, Л.В. Дербунович, М.Л. Малиновський, В.В. Соловійов, О.А. Баркалов, А.А. Шалито, В.С. Харченко, Р-Й. Убар, Г.Ф. Кривуля, В.І. Хаханов, E.G. Hennie, P.G. Bennetts, D. Harel, M. Breuer, M. Abramovici, J. Roth, Y. Zorian, D.Hanna та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами та темами. Розробка розділів дисертації здійснювалася відповідно до планів держбюджетних НДР і договорів, що виконувалися на кафедрі автоматизації проектування обчислювальної техніки (АПОТ) Харківського національного університету радіоелектроніки – держбюджетна НДР «Розумний Кібер Університет – Cloud-Mobile – сервіси управління науково-освітніми процесами», (номер

державної реєстрації 0117U0002524 (2017–2018)) та кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Українського державного університету залізничного транспорту – держбюджетна НДР «Формування теоретичних засад підвищення ефективності використання інформаційно-керуючих систем на залізничному транспорті» № 23/1-2016Б (2015–2017). Здобувач брав участь у проведенні зазначених робіт як виконавець і розробив методи, алгоритми та програмні засоби тестопридатного проектування систем керування на основі кінцевих автоматів.

Науково-практична задача дослідження – розробка моделей і методів автоматизованого проектування та діагностування тестопридатних цифрових систем логічного управління на основі кінцевих автоматів.

Сутність дослідження полягає в підвищенні надійності функціонування критичних систем логічного управління за рахунок скорочення часу та підвищення якості методів діагностування у рамках проведення регламентних робіт щодо технічного обслуговування апаратної частини локальних систем управління технологічно відокремлених об'єктів електроенергетики та газопостачання, побудованих на основі кінцевих цифрових автоматів. Скорочення часу та підвищення якості методів діагностування досягається за рахунок розробки методів проведення тестопридатного проектування та діагностування автоматних систем логічного управління, побудованих на технологічній платформі програмованих логічних інтегральних схем. Тестопридатне проектування здійснюється з використанням інструментальних засобів систем автоматизованого проектування на основі мов опису апаратури.

Ринкова привабливість дослідження. Впровадження моделей та методів тестопридатного проектування критичних систем логічного управління на основі керуючих автоматів приведе до зменшення часу на проектування і технічне обслуговування автоматних систем логічного управління та кількості обслуговуючого персоналу.

Об'єкт дослідження – процес забезпечення тестопридатності цифрових систем на основі кінцевих автоматів.

Предмет дослідження – моделі та методи тестопридатного проектування і діагностування автоматних систем логічного управління на ПЛІС.

Методи дослідження – апарати булевої алгебри, теорії автоматів і графів (подання моделей цифрових автоматів), технічної діагностики (підготовка та проведення діагностичних експериментів), засоби автоматизованого тестопридатного проектування цифрових автоматів (побудова, моделювання та синтез автоматних HDL-моделей).

Мета дослідження – розробка моделей і методів автоматизованого проектування та діагностування автоматних систем логічного управління на ПЛІС з використанням мов опису апаратури для скорочення часу технічного обслуговування критичних систем.

Задачі дослідження:

- 1) визначити особливості діагностування критичних апаратних систем логічного управління;
- 2) удосконалити методи неруйнівних діагностичних експериментів для

моделей кінцевих автоматів;

3) розробити методи побудови апаратних систем підтримки проведення діагностичних експериментів в автоматних системах керування;

4) удосконалити методи оцінки тестопридатності графових моделей кінцевих автоматів;

5) розробити методи підвищення тестопридатності моделей кінцевих автоматів за рахунок розширення вхідного алфавіту;

6) реалізувати розроблені моделі в програмних модулях побудови тестопридатних автоматів в САПР ПЛІС.

Наукова новизна:

1) *вперше* запропоновано розширення вхідного алфавіту кінцевого автомата, яке характеризується введенням додаткового стовпця в таблицю переходів-виходів автомата, що суттєво скоротило довжину та час діагностичного експерименту за рахунок можливості встановлювати автомат в довільний стан;

2) *отримали подальший розвиток* методи проведення діагностичного експерименту за рахунок використання синхронізуючих послідовностей, що дозволяє проводити неруйнівний діагностичний експеримент навіть для автоматів з несправностями функцій переходів;

3) *отримали подальший розвиток* методи побудови апаратних пристроїв діагностування за рахунок реалізації стратегії обходу всіх станів або дуг графа переходів керуючого автомата, що дозволяє проводити діагностичні експерименти, не порушуючи основний режим роботи критичної системи логічного управління протягом тривалого часу;

4) *удосконалено* методи розрахунку тестопридатності кінцевих керуючих автоматів, які, на відміну від існуючих методів, дозволили мінімізувати додаткові апаратні витрати при побудові легкотестованих автоматів.

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає у розробці методики, що дозволяє будувати тестопридатні моделі кінцевих автоматів з використанням мов опису апаратури САПР РЕП та шаблонів автоматного програмування. Розроблені процедури розрахунку тестопридатності кінцевих керуючих автоматів дали можливість оптимізувати створення додаткових переходів у графових моделях автоматів, що дозволило зменшити апаратні витрати при побудові легкотестованих керуючих автоматів. Розроблено програмний модуль із візуальним інтерфейсом для автоматизованого проектування тестопридатних HDL-моделей кінцевих керуючих автоматів. Програмний модуль можна реалізувати у вигляді хмарного сервісу.

Практична реалізація моделей і методів тестопридатного проектування критичних систем логічного управління на основі кінцевих автоматів виконана в рамках створення й верифікації програмних компонентів із візуальним інтерфейсом для автоматизованого проектування тестопридатних HDL-моделей кінцевих керуючих автоматів.

Результати дисертації у складі моделей, методів і фрагментів програмних застосунків упроваджено в навчальному процесі Харківського національного

університету радіоелектроніки (акт про впровадження від 21.12.2018).

Розроблено HDL-моделі, які моделюються та синтезуються інструментальними засобами систем автоматизованого проектування цифрових пристроїв на технологічній платформі ПЛІС. Розроблено програмний модуль із візуальним інтерфейсом для вводу графа переходів керуючого автомата для автоматизованої побудови тестопридатних HDL-моделей автоматів у формі автоматного шаблону в синтезованій підмножині мови опису апаратури VHDL, який був застосований у підрозділах ПрАТ «Енергооблік». Це підприємство є розробником мікропроцесорних вимірювальних приладів та систем тестопридатного проектування (довідка про впровадження від 28.11.2018).

Розроблено методики апаратного діагностування локальних пристроїв керування та регулювання технологічно відокремлених об'єктів електроенергетики та газопостачання. Алгоритми керування описуються граф-схемою алгоритму, яка представляється математичною моделлю графа переходів кінцевого автомата. Для реалізації алгоритму діагностування використовується спосіб обходу всіх дуг графа та моделі керуючого автомата й пристрою діагностування, які описуються мовою опису апаратури VHDL з наступним синтезом та використанням пристроїв програмованої логіки. Ці пристрої були застосовані в підрозділах АТ «Укртрансгаз» для створення систем контролю на автоматичних газорозподільчих станціях, обладнаних сучасними автоматичними приладами, розробленими на базі цифрової техніки (довідка про впровадження від 25.10.2018).

Результати дисертаційної роботи у вигляді автоматної моделі апаратної системи діагностування цифрових пристроїв управління в електроенергетиці й газопостачанні також було застосовано в діяльності підрозділів ПАТ «Харківміськгаз» для створення надійних систем контролю в міських автоматизованих газорозподільчих пунктах, які оснащені сучасним автоматичним обладнанням на базі цифрової техніки. Це дозволило суттєво скоротити час на виявлення та усунення можливих дефектів, які виникають на об'єктах газотранспортної системи, та підвищити ступінь надійності транспортування газу.

Впровадження результатів дослідження у виробничу діяльність ПАТ «Харківміськгаз» (довідка про впровадження від 15.11.2018) забезпечило ефективність вимірів технічних параметрів роботи технологічного обладнання ГРП та вузлів обліку газу, що дозволило аналізувати залежність зміни одних параметрів від інших і, як наслідок, підвищення надійності газопостачання, а також спостереження тенденції щодо скорочення комерційних втрат газу.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові й практичні результати отримані автором особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: [1] – розробка технологічної частини проекту ремонтно-механічного підприємства для газових і енергетичних господарств; [2] – процедури проведення діагностичного експерименту з використанням синхронізуючих послідовностей; [3] – синтез розширених HDL-моделей керуючого автомата Мура інструментальними засобами автоматизованого проектування; [4] – методи зменшення апаратних витрат під час проектування

тестопридатних кінцевих автоматів за рахунок оптимального розміщення додаткових дуг у графі переходів; [5] – методи побудови апаратних пристроїв діагностування, що реалізують стратегію обходу всіх станів або дуг графа переходів керуючого автомата; [6] – метод проектування цифрових автоматів, що самоперевіряються, і синтез схем вбудованого тестового контролю з використанням методів компактного тестування; [7] – використання шаблонів автоматного програмування під час опису систем логічного управління в САПР РЕП; [8] – використання шаблонів автоматного програмування під час опису систем логічного управління в САПР РЕП; [9] – взаємне відображення датчика багатопортового мультиметра і його вплив на точність вимірювання параметрів сигналу й тракту; [10] – проектування логічних блоків управління за допомогою шаблонів опису кінцевих автоматів; [11] – метод розширення таблиці переходів-виходів автомата, який забезпечує режим обходу всіх вершин графа переходів автомата (станів) в режимі діагностування; [12] – синтез легкотестованих цифрових пристроїв і систем; [13] – метод виявлення помилок проектування в кінцевих автоматах із використанням синхронізуючих послідовностей; [14] – методи оцінки ефективності ремонтно-відновлювальних робіт для газового обладнання; [15] – структурний аналіз вимірювальних систем датчиків для газового обладнання та трубопровідних систем; [16] – методи визначення складу допоміжного матеріалу для виробів газового обладнання; [17] – інформаційна модель обліку й аналізу технологічних факторів; [18] – методи автоматизації проектування легкотестованих комп'ютерних систем і пристроїв на основі цифрових автоматів; [19] – методи проектування легкотестованих цифрових машин; [20] – дослідження інформаційних систем обліку та контролю енергоспоживання; [21] – розробка алгоритму прогнозування функціонально-технічного стану виробів газового обладнання; [22] – принципи створення єдиної розподіленої системи автоматичного контролю та обліку енергоресурсів; [23] – побудова розподілених інформаційно-керуючих систем обліку й контролю енергоресурсів; [24] – датчики для газового обладнання та трубопровідних систем; [25] – концепція створення АСУ ТП для об'єктів енергопостачання на базі цифрових розподілених систем; [26] – датчики для газового обладнання та трубопровідних систем;

Апробація результатів дисертації. Результати роботи були представлені та обговорені на таких конференціях: Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Енергозберігаючі технології теплогазопостачання, будівництва та муніципальної інфраструктури» (Харків, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2013); IV та V Міжнародні науково-практичні конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія» (Івано-Франківськ, Вінниця, 2014-2015); Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, УкрДУЗТ, 27-а, 2014; 30-а, 2017; 31-а, 2018); IEEE East-West Design & Test Symposium (Novi Sad, Serbia, 2017); IEEE East-West Design & Test Symposium (Kazan, Russia, 2018); XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатики та моделювання (Харків, НТУ «ХПІ», 2017); 28-th International Scientific Symposium "Metrology and Metrology Assurance" (Sozopol, Bulgaria, 2018).

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображено у 26 друкованих працях, серед яких 1 монографія, 13 статей у наукових журналах із Переліку наукових фахових видань України, 3 статті в міжнародних наукових журналах за кордоном, 5 статей входять до міжнародної наукометричної бази Scopus; 1 стаття – Web of Science; 9 матеріалів міжнародних наукових конференцій (з них 3 за кордоном і 2 входять до наукометричної бази Scopus). Здобувачеві належать 6 публікацій, що входять до наукометричної бази Scopus, індекс Хірша $h = 1$.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація представлена на 215 сторінках (із них 133 сторінки основного тексту) і містить 4 розділи, 77 рисунків, 5 таблиць, список джерел із 140 найменувань (на 16 с.), 8 додатків (на 37 с.)

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність завдань, які вирішуються в дисертаційній роботі, сформульовано мету дослідження й окремо наукову новизну й практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** дано визначення критичних систем логічного управління та показана галузь їх застосування. Проаналізовано основні тенденції автоматизованого проектування керуючих пристроїв на основі кінцевих автоматів. Розглянуто етапи автоматизованого проектування цифрових автоматів, способи подання проектів мовами опису апаратури. Наведено процедури проведення діагностичних експериментів щодо кінцевих автоматів.

Показано роль і місце тестопридатного проектування у загальному циклі автоматизованого проектування цифрових пристроїв. Показано, що основним способом підвищення тестопридатності є внесення апаратурної надлишковості у схемну реалізацію цифрового пристрою. Наведено апаратурні оцінки витрат на тестопридатне проектування. На підставі проведеного аналізу сформульовано мету й завдання дослідження, які орієнтовано на розробку теоретичних основ і практичних засобів тестопридатного проектування автоматних систем логічного управління.

Другий розділ присвячено розробці моделей та методів проведення діагностичних експериментів стосовно керуючих автоматів, наданих мовами опису апаратури, з використанням вбудованих пристроїв діагностування.

В газопостачанні досить поширені віддалені пункти управління, які працюють без/або з мінімальною участю людини, а також без використання персональних комп'ютерів. Незалежно від способу технічної реалізації зазначені системи реалізують оригінальний алгоритм управління, описаний відповідною граф-схемою (ГСА). При цьому виникає проблема діагностики правильного функціонування керуючого автомата (КА) без використання показань реальних датчиків, тому що їх включення до режиму діагностування може порушити процес функціонування критичних систем електроенергетики та газопостачання. Процес діагностування керуючого пристрою має відбуватися в автономному режимі при відключенні систем управління на досить короткий час.

Як приклад, обрана автоматна система управління газорегуляторного пункту (ГРП). На основі спрощеного алгоритму функціонування ГРП, представленого ГСА (рис. 1), складено автоматну модель у вигляді графа переходів КА Мілі. Граф переходів представлено мовою опису апаратури VHDL у формі двопроцесного автоматного шаблону (рис. 2).

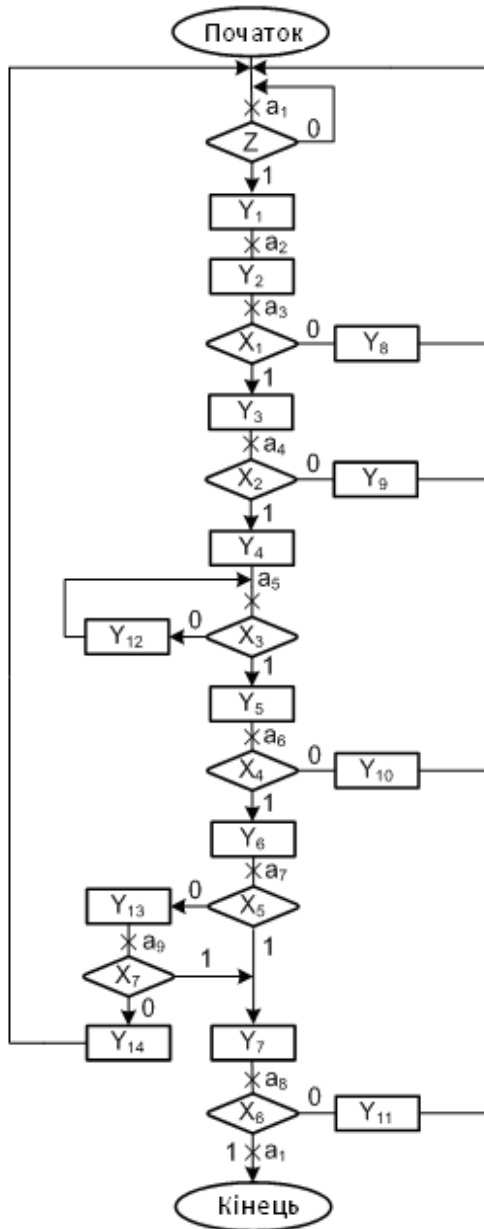


Рис. 1. Спрощена ГСА ГРП

1. Датчик вхідного тиску P_1 (X_1 , зняття показань Y_2). Якщо тиск більше/менше межі, то $X_1 = 0$ і на табло індикації буде горіти світлодіод червоного кольору (Y_8).

2. Датчик температури T_1 (X_2 , зняття показань Y_3). Зі збільшенням температури більше заданої ($X_2 = 0$) на табло індикації буде переданий аварійний сигнал (Y_9).

3. Датчик контролю максимального рівня газоконденсату (X_3 , зняття показань Y_4). У разі досягнення відповідного рівня датчик сигналізуватиме про переповнення ($X_3 = 0$) і відкриття клапана скидання (Y_{12}).

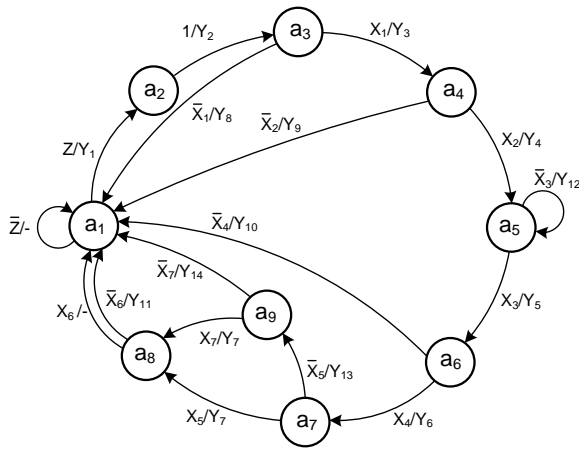
4. Датчик контролю мінімального рівня газоконденсату (X_4 , зняття показань Y_5). При досягненні рівня межі на табло індикації буде переданий аварійний сигнал (Y_{10}).

5. Датчик контролю вихідного тиску P_2 після регулятора (X_5 , зняття показань Y_6). При підвищенні вихідного тиску ($X_5 = 0$) спрацьовує запобіжний скидний клапан (Y_{13}) і ініціюється датчик передачі аварійного сигналу на табло індикації (X_7).

6. Датчик загазованості приміщення ГРП CH_4 (X_6 , зняття показань Y_7). Датчик загазованості вже при концентрації 1% ($X_6 = 0$) при $CH_4 \geq 1\%$ передає аварійний сигнал на табло індикації (Y_{11}).

7. Датчик передачі аварійного сигналу при підвищенні тиску. При ($X_7 = 0$) передається аварійний сигнал на табло індикації (Y_{14}).

Для проведення діагностичного експерименту (ДЕ) щодо пошуку помилок проектування реалізується стратегія обходу всіх дуг графа переходів кінцевого автомата починаючи з початкової вершини. Даний підхід передбачає проведення так званого «неруйнівного» експерименту, у якому в кінці кожної перевірки автомат логічно або примусово повертається до початкового стану. При цьому перевіряються всі поодинокі несправності переходів, а також несправності функцій автомата, що забезпечують ці переходи.



$a1 - a2 - a3 - a1$;
 $a1 - a2 - a3 - a4 - a1$;
 $a1 - a2 - a3 - a4 - a5 - a6 - a1$;
 $a1 - a2 - a3 - a4 - a5 - a6 - a7 - a8 - a1$;
 $a1 - a2 - a3 - a4 - a5 - a6 - a7 - a9 - a1$;
 $a1 - a2 - a3 - a4 - a5 - a6 - a7 - a9 - a8 - a1$.

```

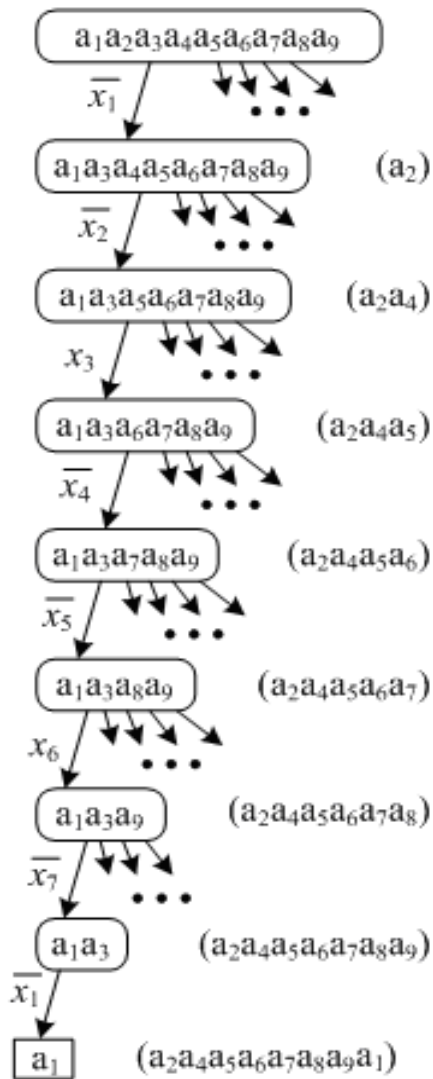
begin
State_CurrentState: process (clk, reset)
begin
  if rising_edge(clk) then
    if reset='1' then State <= A1;
    else State <= NextState;
    end if;
  end if;
end process;

State_NextState: process (X, State)
begin
Y<= (others=>'0');
case State is
when "0001" =>
  if (X(0)='1') then NextState <= A2;
                    Y(1) <= '1';
  elsif (X(0) = '1') then NextState <= A1;
  else NextState <= A1;
  end if;
end if;
end process;
  
```

Рис. 2. Граф переходів, стратегія проведення ДЕ та VHDL-модель ГРП

Основна проблема побудови «неруйнівного ДЕ» полягає в поверненні автомата до початкового стану навіть при наявності в його HDL-моделі або в схемній реалізації помилкового переходу і навіть без використання сигналів скидання до початкового стану. Ця умова є критичною для так званого «невиключного» класу автоматів, для яких вихідні сигнали щодо різних станів можуть не розрізнятися. Для вирішення цієї задачі запропоновано використовувати синхронізуючі послідовності (СП), які повертають автомат до заданого стану з будь-якого стану. СП для заданого автомата може бути знайдена із синхронізуючого дерева, яке є деревом наступників, побудованим за певними правилами. На рис. 3, а) наведено фрагмент побудови СП для розглянутого автомата Мілі.

Виходячи з синхронізуючого дерева визначимо СП $\overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \overline{x_4} \overline{x_5} \overline{x_6} \overline{x_7} x_1$ або (00100100). Розглянемо помилкову VHDL-модель з помилкою проектування типу «помилкове призначення нового стану». Фрагмент VHDL-коду та результати моделювання VHDL-моделі з помилкою призначення та СП наведені на рис. 3, б). Таким чином СП, повертає HDL-модель автомата до початкового стану, але для реального пристрою керування може бути визначена така СП, яку фізично реалізувати неможливо на наведеній системі вхідних датчиків. Наприклад, СП $\overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \overline{x_4} \overline{x_5} \overline{x_6} \overline{x_7} x_1$ не можна реалізувати в стані a_4 , оскільки реальний температурний датчик не може в одному циклі роботи керуючого автомата трапляти в робочий діапазон температур ($x_2 = 1$) або виходити за його межі ($x_2 = 0$). У реальних системах логічного управління під час діагностування керуючого пристрою (КП) доцільно використовувати інший підхід, а саме: будувати систему імітації сповіщувальних вхідних сигналів КА в алфавіті $\{0, 1\}$ при відключенні самих датчиків.



а)

when "0110" =>
 if (X(4)='1') then
 NextState <= A7; Y(6) <= '1';
 elsif (X(4) = '0') then
 NextState <= A4; Y(10) <= '1';
 --(замість nextstate <= a1)
 else NextState <= A1;
 end if;

Signal name	Value	
State	2	1 2 3 4 5 6 4 1
NextState	3	2 3 4 5 6 4 1 2
Y	1000	1000 0010
Y[1]	0	
Y[2]	1	
Y[3]	0	
Y[4]	0	
Y[5]	0	
Y[9]	0	
Y[10]	0	
clk	0 to 1	
reset	0	СП
X	24	F0 24
X[0]	1	
X[1]	1	
X[2]	1	
X[3]	1	
X[4]	0	

б)

Рис. 3. Синхронізує дерево та ДЕ з пошуку помилки у VHDL-моделі ГРП

Для цього запропоновано апаратну реалізацію пристрою діагностування (ПД), який забезпечує виконання всіх переходів по графу КА, тобто фактично реалізує його пряму структурну таблицю. Структурна схема об'єкта керування (ОК) з ПД представлена на рис. 4.

Суть проведення ДЕ з використанням ПД полягає в тому, що при підготовці ДЕ будуються шляхи обходу графа переходів КА. При $T_M = 1$ на вхід ПД надходить послідовність станів автомата, які необхідно перевірити (порядок опитування відповідних датчиків, який позначається при подачі в керуючий пристрій (КП) масивом X), і на виході ПД буде формуватися послідовність сповіщувальних сигналів YX , які «імітують» роботу ОК. Сигнали YX через мультиплексор надходять у КП (у форматі сповіщувальних сигналів X , що надходять з об'єкта керування) та ініціюють його роботу. Керуючий пристрій, в свою чергу, формує вихідні сигнали Y , які надходять на ОК.

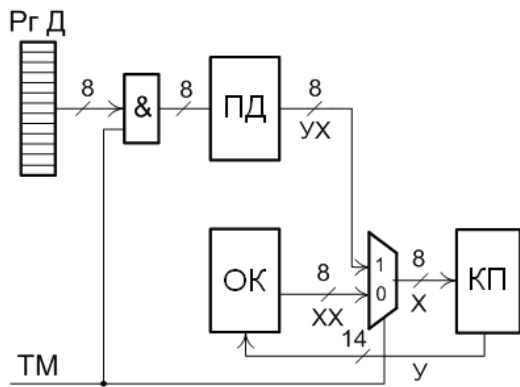


Рис. 4. Апаратний ПД

На рис. 4 РгД – реєстр даних, куди заноситься черговий варіант обходу графа; У – керуючі сигнали; ХХ – сповіщувальні сигнали ОК (в нашому випадку логічно оброблені показники датчиків); Х – сповіщувальні сигнали для керуючого пристрою; УХ– «імітація» сповіщувальних сигналів пристроєм діагностування; ТМ (test mode) – режим роботи ПД (ТМ = 0 – робота в режимі керування, ТМ = 1 – робота в режимі діагностування).

На підставі алгоритму діагностування будується VHDL-модель апаратного пристрою діагностування. Верифікація моделі розробленого пристрою діагностування виконується з використанням системи моделювання Active-HDL. Синтез пристрою управління і пристрою діагностування виконується за допомогою САПР XILINX ISE. Як видно з таблиці, апаратні витрати на реалізацію додаткового ПД можна порівняти з витратами на основний КП, що не є ефективним.

Вибраний пристрій: 3s500efg320-5	Апаратні витрати на КП	Апаратні витрати на ПД
Number of Slices	10 out of 4656	23 out of 4656
Number of Flip Flops	9 out of 9312	35 out of 9312
Number of 4-in LUTs:	18 out of 9312	17 out of 9312
Number of IOs	24	10
Number of IOBs	24 out of 232	10 out of 232
Number of CLKs	1	1

У разі таких результатів для побудови надійних КП краще застосувати дублювання. Ефективнішим методом реалізації легко-тестованого КА є тестопридатне проектування.

Основні результати розділу опубліковані в [1, 2, 5, 12, 15].

У **третьому розділі** розглянуто методи тестопридатного проектування керуючих автоматів за рахунок розширення вхідного алфавіту шляхом введення додаткового стовпця в таблицю переходів-виходів автомата, що суттєво скорочує довжину та час діагностичного експерименту за рахунок можливості встановлювати автомат в довільний стан.

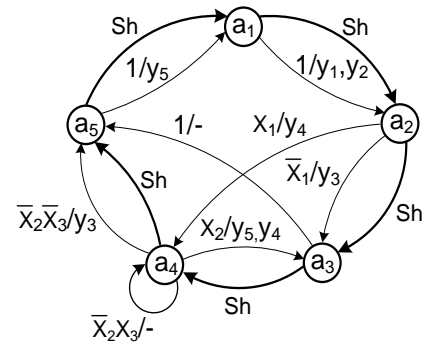
При проектуванні тестопридатних керуючих автоматів апаратну надлишковість, що забезпечує легкотестованість, доцільно вносити ще на початковому етапі проектування, тобто при побудові HDL-моделей пристроїв, що проектуються. Легкотестованим будемо називати кінцевий автомат, для якого можна побудувати ДЕ мінімальної довжини шляхом забезпечення встановлення КА у довільний стан за $(n - 1)$ тактів, де n – кількість станів автомата.

Основний принцип методів структурного тестопридатного проектування схем полягає в організації сканування запам'ятовуючої частини КА, або просто сканування. При реалізації методу сканування шляху кожному елементу пам'яті передує мультіплексор «2-1», керований загальним сигналом вибору режиму сканування. Таким чином, у режимі сканування елементи пам'яті можна досить легко встановити в будь-який із множини станів, що подають послідовність

сигналів на вхід сканованих даних та тактують елементи пам'яті за допомогою синхроїмпульсів.

Запропоновано та теоретично обґрунтовано введення додаткового стовпця (символу) в таблицю переходів-виходів (ТПВ) автомата, що забезпечує для цього символу функцію переходів графа переходів зсувного регістру і який дозволяє встановити автомат в будь-який заданий стан. На підставі зазначених теоретичних положень розширимо ТПВ автомата Мілі шляхом додавання стовпчика Sh (Shift). При Sh = 1 автомат працює в режимі установки в будь-який заданий стан, а при Sh = 0 автомат реалізує заданий алгоритм. Розширена ТПВ та модифікований граф переходів автомата Мілі подані на рис. 5.

a	1	x ₁	$\overline{x_1}$	x ₂	$\overline{x_2}x_3$	$\overline{\overline{x_2}x_3}$	Sh
a ₁	a ₂ / y ₁ ,y ₂						a ₂ /-
a ₂		a ₃ / y ₃	a ₄ /y ₄				a ₃ /-
a ₃	a ₅ /-						a ₄ /-
a ₄				a ₃ /y ₄ ,y ₅	a ₄ /-	a ₅ /y ₃	a ₅ /-
a ₅	a ₁ / y ₅						a ₁ /-



а)

б)

Рис. 5. Розширена ТПВ – а), модифікований граф переходів КА Мілі – б)

На рис. 6 представлено фрагмент архітектури VHDL-моделі легкотестованого автомата Мілі з додатковим сигналом Sh та результати його моделювання. Рівняння функції збудження для розряду D₂ за результатами синтезу буде: $D_2 = Q_2Q_3x_3\overline{x_2}Sh \vee \overline{Q_2}Q_3x_1\overline{Sh} \vee Q_2Q_3x_2\overline{Sh} \vee \overline{Q_2}Q_3x_1\overline{Sh} \vee (Q_2Q_3 \vee \overline{Q_2}Q_3)Sh$. Аналіз цього виразу показує, що відносно сигналу Sh фактично реалізується мультиплексор, що підтверджує синтез легкотестованої схеми з можливістю реалізації зсувного регістру в запам'ятовуючій частині автомата.

```

Sreg0_NextState: process (State, Sh, x1, x2, x3)
begin
y1 <= '0'; y2 <= '0'; y3 <= '0'; y4 <= '0'; y5 <= '0';
case State is
when a1 => if Sh = '1' then NextState <= a2;
            else NextState <= a2; y1 <= '1'; y2 <= '1';
            end if;
when a2 => if Sh = '1' then NextState <= a3;
            elsif x1='1' then NextState <= a4; y4<='1';
            else NextState <= a3; y3 <= '1';
            end if;
...
when a5 => if Sh = '1' then NextState <= a1;
            else NextState <= a1; y5 <= '1';
            end if;
when others => NextState <= a1;
end case;
end process;
    
```



Рис. 6. VHDL-модель легкотестованого КА Мілі та її моделювання

Аналіз різних варіантів схемної реалізації (синтезу) HDL-моделей легкотестованих автоматів дозволяє оцінити величину додаткових витрат апаратури за допомогою критерію Квайна. Витрати по Квайну визначаються як

сумарна кількість входів усіх вентилів у схемі, оскільки число входів вентиля пропорційно числу транзисторів в ньому.

Тип автомата	Число тригерів	Витрати по Квайну
Мура, стандартний	3	82
Мілі, стандартний	3	110
Мура з додатковим стовпцем в ТПВ	3	104
Мілі з додатковим стовпцем в ТПВ	3	130

Синтез тестопридатних моделей КА з додатковим стовпцем у ТПВ засобами САПР XILINX ISE показав, що апаратурні витрати при цьому зростають в середньому на 20–25 % в залежності від типу автомата.

Розглянуто аналіз апаратурних витрат на забезпечення тестопридатності КА при різних варіантах організації додаткового переходу між станами автомата в залежності від наявності безумовного переходу, умовного переходу та відсутності переходів між станами у початковому графі автомата, що аналізуються. На рис. 7 наведено приклад додавання Sh до переходів між a_i і a_j при наявності переходів і в інші стани, відмінні від a_j .

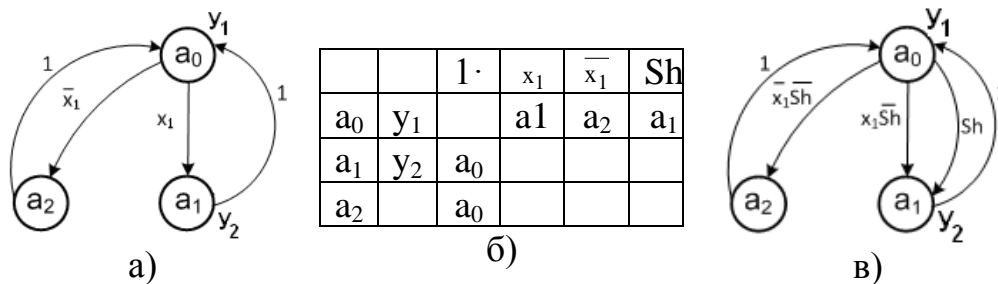


Рис. 7. Додавання Sh при наявності переходів між a_0 і a_1 та інших переходів.

При цьому функція переходу в стан a_i (a_1) для одного вихідного переходу, доданого переходу Sh та переходу в стан $a_k \neq a_j$ (рис. 7, в) матиме вигляд: $a_j = a_i Sh \vee a_i x_1 \bar{Sh} = a_i (Sh \vee x_1 \bar{Sh}) = a_i Sh \vee a_i x_1$.

При реалізації вихідного виразу для функції переходу в a_j додаткові апаратурні витрати – це вентиль, який реалізує терм $a_i Sh$, плюс додатковий вхід у вентиль, який реалізує терм вихідної функції переходів. Якщо переходів $a_i \rightarrow a_j$ в початковому графі більше одного, то для кожного з цих переходів додається додатковий вхід у вентиль.

Крім того, в цьому варіанті ($\forall (a_i \rightarrow a_k), a_k \neq a_j$) переходи $a_i \rightarrow a_k$ також несуть додаткові апаратурні витрати у вигляді додаткового входу \bar{Sh} у вентиль, який реалізує терм початкової функції переходів (рис. 7, в), $a_k = a_i x_1 \bar{Sh}$.

Оптимальним з точки зору апаратурних витрат способом організації додаткових переходів при установці КА у довільний стан є той перехід, для якого сумарна оцінка апаратурних витрат для функцій збудження мінімальна з урахуванням кодування станів автомата.

Аналіз апаратурних витрат показує, що існує прямо пропорційна залежність між складністю функції переходів ($a_m \rightarrow a_n$) та додатковими апаратурними витратами на введення додаткової дуги Sh на цьому переході.

Отже, для оптимального розміщення додаткових дуг Sh будемо використовувати показники досяжності D_m , D_n вершин графа переходів:

$$D_n = \min_{k=1}^K (D_{m+k} + W_{m+k}) \quad W_{m+k} = q_{m+k} * \sum_{i=1}^R p_r$$

де W_{m+k} – коефіцієнт досяжності; R – кількість умов переходу на k -й дузі; p_r – вага відповідної умови переходу; q_{m+k} – кодова відстань між двійковими кодами станів автомата a_{m+k} та a_n .

Додаткову дугу необхідно ставити на переході ($a_m \rightarrow a_n$) для якого різниця досяжностей мінімальна, тобто функція переваги виглядатиме так: $F = \min |D_m - D_n|$.

Для організації неруйнівного ДЕ по обходу всіх вершин графа переходів КА необхідно організувати один або декілька гамільтонових циклів. Оптимальним із точки зору часу проведення буде такий ДЕ, який матиме мінімальну кількість гамільтонових циклів. Для мінімізації кількості гамільтонових циклів в графі шляхом введення додаткових дуг Sh між тими вершинами, де в початковому графі переходів не було, будемо використовувати умови теореми Бонді-Хватала. З точки зору мінімізації апаратних витрат перевага надається такому циклу, для якого функція переваги (вага p -го шляху)

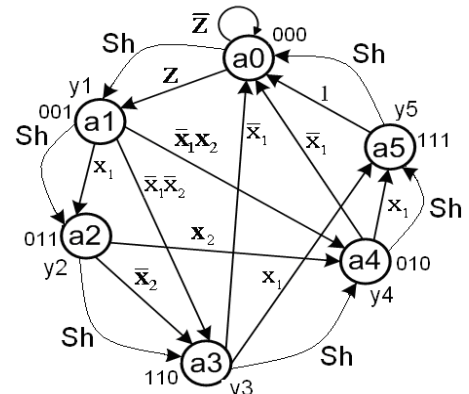
буде $S_p = \min \sum_{i=1}^H W_{m,n}$. Основні результати розділу опубліковані в [3, 4, 7, 11].

У **четвертому розділі** проведено апробацію й оцінку розроблених методів тестопридатного проектування HDL-моделей керуючих автоматів засобами САПР ПЛІС, наведено опис програмних продуктів, що забезпечують автоматизацію проектування тестопридатних КА, а також оцінено додаткові апаратні витрати.

В якості прикладу побудови тестопридатного керуючого автомата (КА) розглядатимемо мікропрограмний автомат (МПА) складання чотирирозрядних двійкових знакових чисел в додатковому модифікованому коді. Для цієї мікропрограми в якості КА розглядається автомат Мура при обранні пари станів автомата, між якими встановлюється додатковий перехід (дуга Sh у графі переходів автомата), обирається той стан-наступник, для якого сумарна оцінка апаратних витрат для функцій збудження мінімальна з урахуванням кодування станів автомата. При цьому відсутність переходів між станами прирівнюється до переходу з однією умовою. Для організації єдиного гамільтонового циклу вводиться додатковий перехід ($a_3 \leftrightarrow a_4$). На рис. 8, а) наведені таблиця переходів-виходів зі стовпцем Sh та граф переходів із додатковими дугами Sh (рис. 8, б) при організації обходу вершин графу за природною нумерацією a_0 – a_1 – a_2 – a_3 – a_4 – a_5 – a_0 і вага цього шляху $S_1 = 13$. Другий варіант обходу станів (стовпця Sh) буде a_1 – a_2 – a_4 – a_3 – a_5 – a_0 , для нього $S_2 = 8$, що обумовлює перевагу другого варіанта шляху.

a/y	1	Z	x ₁	\bar{x}_1	x ₂	\bar{x}_2	$\bar{x}_1\bar{x}_2$	\bar{x}_1x_2	Sh
a0		a1							a1
a1	y1		a2				a3	a4	a2
a2	y2				a4	a3			a3
a3	y3		a5	a0					a4
a4	y4		a5	a0					a5
a5	y5	a0							a0

a)



б)

Рис. 8. Перший варіант ТПВ тестопридатного керуючого МПА (а) та його граф переходів (б)

```

when a2=> if sh='1' then NextState <= a3 -- (a4)
           elsif x2='1' then NextState <= a4;
           else NextState <= a3;
           end if;

```

Рис. 9. Фрагмент легкотестованого коду

На рис. 9 наведено фрагмент VHDL-коду, який реалізує введення додаткової дуги Sh для першого та другого варіантів обходу станів КА.

За результатами синтезу в аналітичному виді функції збудження тригера першого розряду (при першому та другому варіантах розміщення дуг Sh) будуть:

$$D_1^1 = (Q_1 \bar{Q}_3 \vee \bar{Q}_1 Q_2 \bar{Q}_3) x_1 \bar{Sh} \vee \bar{Q}_1 Q_2 Q_3 x_2 \bar{Sh} \vee (Q_1 Q_2 \bar{Q}_3 \vee \bar{Q}_1 Q_2 Q_3) Sh \vee \bar{Q}_2 Q_3 x_1 x_2 \bar{Sh},$$

$$D_2^1 = (Q_1 \bar{Q}_3 \vee \bar{Q}_1 Q_2 \bar{Q}_3) x_1 \bar{Sh} \vee \bar{Q}_1 Q_2 Q_3 x_2 \bar{Sh} \vee (Q_1 \bar{Q}_3 \vee \bar{Q}_1 Q_2 \bar{Q}_3) Sh \vee \bar{Q}_2 Q_3 x_1 x_2 \bar{Sh},$$

тобто зменшення буде становити на один вхід вентиля та один інвертор, що дає 4 % при оцінці по Квайну. Загальні апаратні затрати по Квайну при синтезі для схеми без Sh – 133, при першому варіанті схеми з Sh за умови кодування станів КА, яке формує САПР, – 187, а при другому варіанті – 184, що обумовлює збільшення апаратних витрат відповідно на 40 % та 38 %. Це підтверджує перевагу другого варіанта гамільтонового циклу, що було визначено за показниками обчислення показників досяжності.

В рамках реалізації розроблених моделей і методів проведення діагностування створено програмний модуль із візуальним інтерфейсом, який дозволяє будувати state diagram і отримати простий та легкотестований HDL-код КА на її основі.

Переваги розробленого програмного продукту наступні: відсутність інсталяції, потреба лише Internet-браузера, який підтримує Javascript, можливість автоматичної побудови легкотестованого VHDL-коду, швидкість отримання коду, програмний продукт може бути реалізований у вигляді хмарного сервісу. При побудові програмного продукту було використано такі інструментальні засоби: сучасний браузер (Chrome), мова програмування Javascript, редактор коду Sublime 2, бібліотека jQuery, функції Canvas, формат вихідних даних – мова опису апаратури VHDL (код у форматі *.vhd).

На рис. 10 представлено приклад формування легкотестованої

VHDL-моделі КА ГПП. На рис. 10, а) представлений візуальний інтерфейс програмного модуля побудови VHDL-моделі тестопридатного керуючого автомата на основі графа переходів. На початку вводу графа переходів задається ім'я проекту (Entity), ім'я архітектури, спосіб установки у початковий стан та тип синхронізації (передній або задній фронт). При зображенні графа переходів кожній вершині надається ім'я та, при необхідності, двійковий код стану. Кожній вершині (дузі) ставиться у відповідність логічний вираз функції переходів та виходів. На рис. 10, б) наведено фрагмент легкотестованого VHDL-коду, який генерується автоматично. Отриманий код у форматі *.vhd запам'ятовується у файл та може бути безпосередньо використаний для моделювання та синтезу тестопридатного КА.

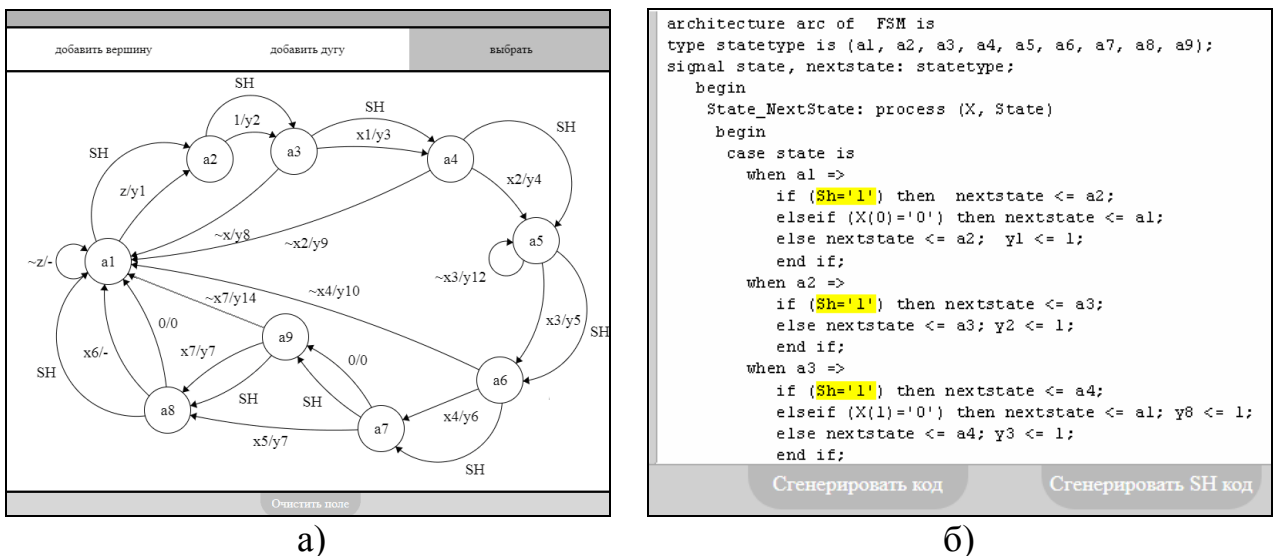


Рис. 10. Приклад формування легкотестованої VHDL-моделі КА ГПП

Signal name	Value	200	400	6				
State	6	U	1	2	3	4	5	6
NextState	1	U	2	3	4	5	6	1
Y	00	00	00	00	00	00	00	00
Sh	1							

№	Тип: ПЛИС Spartan 3E	Апаратні витрати	Зі входом Sh
1	Кількість модулів	10 out of 4656	12
2	Кількість тригерів	9 out of 4656	12
3	Кількість 4-х входних LUT	18 out of 9312	22
4	Number of IOs	24	25
5	Number of bonded IOBs	24 out of 232	25

Рис 11. Моделювання та синтез КА

На рис. 11 подано результати моделювання розробленої VHDL-моделі тестопридатного КА Мілі для ГПП по обходу послідовності станів a1–a2–a3–a4–a5–a6–a1 за наявності сигналу Sh. Схемна реалізація VHDL-моделі засобами САПР XILINX ISE на ПЛИС Spartan 3E довела, що додаткові апаратні витрати для синтезу тестопридатного КА Мілі для ГПП у середньому не перевищують 25 % від загальних апаратних витрат на основний КА. Це підтверджує ефективність запропонованих підходів щодо автоматизованого проектування легкотестованих КА.

Аналіз ефективності запропонованих методів забезпеченості тестопридатності КА здійснювався шляхом аналізу апаратурних витрат щодо отримання результатів синтезу за критерієм Квайна для різних типів КА та різних способів забезпечення додаткових переходів у графах КА, що показано на рис. 12.

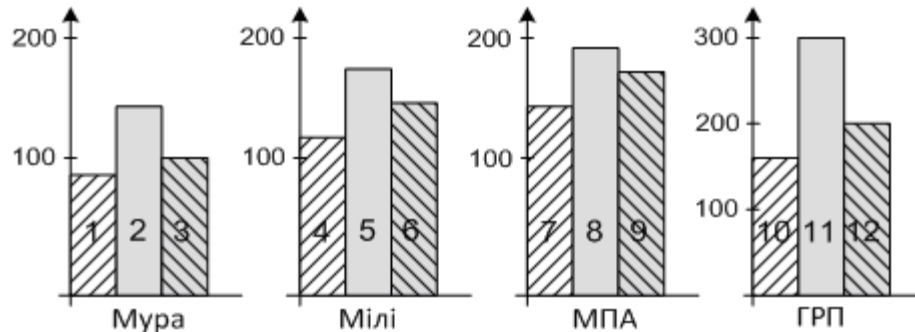


Рис.12. Порівняльний аналіз апаратурних витрат:

1 – апаратурні витрати (АВ) на простий КА Мура; 2 – АВ на тестопридатний КА Мура із зсувним регістром; 3 – АВ на легкотестований КА Мура з додатковим стовпцем Sh в ТПВ; 4 – АВ на простий КА Мілі; 5 – АВ на тестопридатний КА Мілі з зсувним регістром; 6 – АВ на легкотестований КА Мілі з додатковим стовпцем Sh в ТПВ; 7 – АВ на простий МПА Мура; 8 – апаратурні витрати на тестопридатний МПА Мура з природною послідовністю Sh; 9 – АВ на тестопридатний МПА Мура з оптимальною послідовністю Sh; 10 – АВ на простий КА в контурі регулювання ГРП; 11 – АВ на КА з пристроєм діагностування в контурі регулювання ГРП; 12 – АВ на легкотестований КА Мілі з додатковим стовпцем Sh в ТПВ у контурі регулювання ГРП.

Наведені результати довели достовірність та ефективність запропонованих методів внесення надлишковості в схему реалізацію КА з метою забезпечення легкотестованості КА в системах логічного управління.

Основні результати розділу опубліковані в [4, 5, 8, 10].

ВИСНОВКИ

Проведені науково-технологічні дослідження в рамках дисертаційної роботи вирішують актуальну науково-практичну задачу розробки моделей і методів автоматизованого проектування та діагностування тестопридатних цифрових систем логічного управління на основі кінцевих автоматів.

Автором одержано такі наукові та практичні результати:

1. *Нова модель* розширення вхідного алфавіту кінцевого автомата за рахунок введення додаткового стовпця в таблицю переходів-виходів автомата та додаткового входу в схему реалізацію керуючого автомата, що дозволило за рахунок додаткових переходів встановлювати керуючий автомат у довільний стан за $(n - 1)$ тактів, де n – кількість станів керуючого автомата. Це суттєво скоротило довжину, час та точність методів проведення контролю і діагностики апаратної частини автоматних систем логічного керування.

2. *Удосконалені* методи проведення діагностичного експерименту з використанням синхронізуючих послідовностей, що дозволило повертати автомат в початковий стан навіть для автоматів з несправностями функцій переходів. Це дало можливість проводити неруйнівні діагностичні експерименти шляхом побудови гамільтонового циклу для невиключного класу керуючих автоматів, у яких функції виходів для різних станів можуть не відрізнятися.

3. *Розвинені* методи побудови апаратних пристроїв діагностування, що реалізують стратегію обходу всіх станів або дуг графа переходів керуючого автомата шляхом імітації алгоритму роботи операційного автомата в системі логічного управління. Це дозволило проводити процедури діагностування в рамках здійснення робіт з технічного обслуговування автоматних пристроїв керування, не порушуючи основний режим роботи критичної системи логічного управління на тривалий час.

4. *Удосконалені* методи розрахунку тестопридатності цифрових автоматів шляхом розрахунку досяжності вершин (станів) у графах переходів керуючих автоматів, які на відміну від існуючих методів, враховують складність функцій переходів та виходів. Працездатність запропонованого методу підтверджено перевіркою результатів за допомогою математичного методу шляхів та гілок. Це дозволило мінімізувати додаткові апаратні витрати при побудові легкотестованих автоматів за рахунок введення додаткового входу сканування станів, що підтверджено оцінками по Квайну синтезованих моделей автоматів.

5. *Новий підхід* до автоматизованого проектування тестопридатних кінцевих автоматів за рахунок побудови моделей з використанням мов опису апаратури (HDL-моделей), у яких додаткові переходи реалізуються шляхом додавання умовних операторів до опису функцій переходів і автоматного шаблону мовою опису апаратури VHDL. Розроблені VHDL-описи моделюються та синтезуються інструментальними засобами систем автоматизованого проектування цифрових пристроїв XILINX ISE на технологічній платформі ПЛІС Spartan 3E.

6. *Програмний модуль* з візуальним інтерфейсом для введення графа переходів керуючого автомата та автоматизованої побудови тестопридатних HDL-моделей керуючих автоматів у формі автоматного шаблону у синтезованій підмножині мови опису апаратури VHDL. Програмний модуль розроблений з використанням мови програмування JavaScript і може використовуватися як у локальному варіанті, так і у вигляді хмарного сервісу. Автоматизований синтез легкотестованої VHDL-моделі КА в системі управління КП ГРП з використанням додаткових дуг Sh підтвердив, що цей підхід по-перше, дає не більше 25% додаткових апаратних витрат, а, по-друге, дає менші апаратні витрати у порівнянні з іншими підходами підвищення тестопридатності (вбудований пристрій діагностування та додатковий регістр зсуву).

Ринкова привабливість дослідження. Впровадження моделей та методів тестопридатного проектування критичних систем логічного управління на основі керуючих автоматів приведе до зменшення часу на проектування і технічне обслуговування автоматних систем логічного управління та кількості обслуговуючого персоналу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Пахомов Ю. В. Технологія ремонту газового обладнання і трубопровідних систем, монографія / І. І. Капцов, В. Г. Котух, Ю. В. Пахомов. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 232 с.

2. Пахомов Ю. В. Проведення діагностичних експериментів у керуючих автоматах з використанням синхронізуючих послідовностей / [М. А. Мірошник, О. С. Шкіль, Ю. В. Пахомов та ін.] // *Радіоелектроніка та інформатика: наук.-техн. журнал.* – Харків: ХНУРЕ, 2018. – № 3 – С. 82-89 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/-p24787015.3.html>), Google Scholar, CiteFactor, NBUV, SIS, OAJI.net, Cyberleninka, OECSP, Scholar Steer, TIU Hannover, I2OR).

3. Pakhomov Y. Design automation of easy-tested digital finite state machines / [М. А. Miroshnik, Y. V. Pakhomov, A. S. Shkil та ін.] // *Radio Electronics, Computer Science, Control, the scientific journal, Zaporizhzhia National Technical University.* – 2018. – № 2. – Р. 117-124 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Thomson Reuters Web of Science (WoS), CiteFactor, COPAC, CrossRef, eLibrary.ru / РИНЦ, GENERAL IMPACT FACTOR, Google Scholar, Impactfactor.pl, Index Copernicus, Scholar Steer, SIS, SSM).

4. Пахомов Ю. В. Аналіз апаратурних витрат при тестопридатному проектуванні керуючих цифрових автоматів / [М. А. Мірошник, Ю. В. Пахомов, О. С. Шкіль та ін.] // *Вісник СХУ ім. В. Даля.* – 2018. – № 6. – С. 101-109 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами eLibrary.ru, NBUV, WorldWideScience.org, ScienceDirect, Google Scholar, WorldCat, BASE, DOAJ, URAN).

5. Pakhomov Y. V. Model of automated hardware diagnostics of remote energy systems management points / М. А. Miroshnyk, Y. V. Pakhomov // *Світлотехніка та електроенергетика: міжнар. наук.-техн. журнал.* – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. – 2017. – № 3. – С. 3-9 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Index Copernicus, Google Scholar, WorldCat).

6. Пахомов Ю. В. Методы проектирования самопроверяемых цифровых автоматов / [М. А. Миррошник, Э. Н. Кулак, Ю. В. Пахомов та ін.] // *Радиотехника: всеукр. межвед. науч.-техн. зб.* – Харків: ХНУРЕ, 2016. – № 187. – С. 124-131 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Google Scholar, НБУВ, Elibrary.ru).

7. Пахомов Ю. В. Методы синтеза легкотестируемых цифровых автоматов / А. С. Гребенюк, М. А. Миррошник, Ю. В. Пахомов, И. В. Филиппенко // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: науково-техн. журнал.* – Харків: УкрДУЗТ. – 2016. – № 5. – С. 28-39 (Реферується або індексується міжнародними базами Google Scholar, РИНЦ, Elibrary.ru).

Результати, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Pakhomov Y. Design of Logical Control Units Based on Finite State Machines' Patterns / [M. Miroshnyk, Y. Pakhomov, A. Shkil et al.] // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018, Kazan, Russia, 14-17 Sept. 2018) – 6 p (Indexed by Scopus).

9. Pakhomov Y. V. Microware multiport multimeter sensor mutual reflection and its influence on signal and tract parameter measurement accuracy / [M. A. Miroshnyk, O. B. Zaichenko, Y. V. Pakhomov et al.] // 28-th International Scientific Symposium "Metrology and Metrology Assurance" (Sozopol, Bulgaria, 10-14 Sept. 2018). – P. 60-64 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Elibrari.ru, Erih plus, Scince Index, DOAJ, РИНЦ).

10. Пахомов Ю. В. Проектирование логических блоков управления с помощью шаблонов описания конечных автоматов / М. А. Мирошник, Ю. Н. Салфетникова, Ю. В. Пахомов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: 31-а міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, УкрДУЗТ, 24-26 жовт. 2018р.). – № 4. – С. 21-22 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Google Scholar, РИНЦ, Elibrary.ru).

11. Pakhomov Y. Design automation of testable finite state machines / [M. Miroshnyk, Y. Pakhomov, S. Shkil et al.] // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017, Novi Sad, Serbia, Sept. 27-Oct. 2, 2017). – P 203-208 (Indexed by Scopus, IEEE Xplore).

12. Пахомов Ю. В. Исследование методов синтеза легкотестируемых цифровых устройств и систем / М. А. Мирошник, В. А. Крылова, Ю. В. Пахомов, А. Н. Мирошник // Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2017): 17-та міжнар. наук.-техніч. конф. (Харків, НТУ «ХП», 11-15 вер. 2017р.) С. 58-59 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Index Copernicus, Google Scholar, OAJ, Cyberleninka, WorldCat, BASE, UIF, DOAJ, NBUV MIAR, DOI, CrossRef).

13. Пахомов Ю. В. Методы обнаружения ошибок проектирования в конечных автоматах с использованием синхронизирующих последовательностей / М. А. Мирошник, Ю. В. Пахомов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: 30-а міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, УкрДУЗТ, 26-27 жовт. 2017р.). – № 4. – С. 15-16 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Google Scholar, РИНЦ, Elibrary.ru).

14. Пахомов Ю. В. Методи оцінки ефективності ремонтно-відновлювальних робіт для виробів газового обладнання та трубопроводних систем / М. А. Мирошник, В. Г. Котух, Ю. В. Пахомов. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: 5-та міжнар. наук.-практ. конф. (Івано-Франківськ, Вінниця, 27-29 трав. 2015р.). – С. 15-16 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Google Scholar, РИНЦ, DOAJ).

15. Пахомов Ю. В. Структурный анализ измерительных систем датчиков для газового оборудования и трубопроводных систем / М. А. Мирошник, В. Г. Котух, Ю. В. Пахомов // Інформаційні технології та комп'ютерна

інженерія: 4-та міжнар. наук.-практ. конф. (Вінниця, 28-30 трав. 2014р.). – С. 32-34 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Google Scholar, РІНЦ, DOAJ).

16. Пахомов Ю. В. Системный подход к определению состава вспомогательного материала для изделий газового оборудования и трубопроводных систем / М. А. Мирошник, В. Г. Котух, Ю. В. Пахомов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: 27-а міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, УкрДУЗТ, 24-26 вер. 2014р.). – № 4. – С. 30-31 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Google Scholar, РІНЦ, Elibrary.ru).

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:

17. Pakhomov Y. Information model of registration and analysis of technological factors arising during final processing of products of transport pipeline systems / V. Kotukh, N. Kaptsova, Y. Pakhomov, V. Kosenko // International Journal of Engineering and Technology (UAE, ISSN: 2227-524X). – 2018. – № 2.23. – С. 73-76 (Indexed by Scopus, IEEE Xplore).

18. Пахомов Ю. В. Методы автоматизации проектирования легкотестируемых компьютерных систем и устройств на основе цифровых автоматов / М. А. Мирошник, Л. А. Клименко, Ю. В. Пахомов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: науково-техн. журнал. – 2018. – № 4. – С. 3-10 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Google Scholar, РІНЦ, Elibrary.ru).

19. Pakhomov Y. Methods for Designing Self-Checking Digital Machines / [M. Miroshnyk, E. Kulak, Y. Pakhomov та ін.] // Telecommunications and Radio Engineering, USA. – 2017. – № 15. – С. 1367-1377 (Indexed by Scopus, IEEE Xplore).

20. Pakhomov Y. Konstruktion of Distributed Information Management Systems for Accounting and Control of Energy Consumption at the Example of Gas / V. Kotukh, Y. Pakhomov // Telecommunications and Radio Engineering, USA. – 2016. – № 7. – С. 631-641 (Indexed by Scopus, IEEE Xplore).

21. Пахомов Ю. В. Разработка алгоритма прогнозирования функционально-технического состояния изделий газового оборудования и трубопроводных систем / Ю. В. Пахомов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова: науч.-теор. журнал. – 2015. – № 3. – С. 90-97 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами, Elibrary.ru, РІНЦ, IAC, Science index).

22. Пахомов Ю. В. Основные принципы создания единой распределенной системы автоматического контроля и учета энергоресурсов на примере газовой отрасли / В. Г. Котух, Ю. В. Пахомов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: науково-техн. журнал. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – № 3. – С. 48-55 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Google Scholar, РІНЦ, http://elibrary.ru/title_about.asp?id=33934).

23. Пахомов Ю. В. Построение распределенных информационно-управляющих систем учета и контроля энергоресурсов на примере газовой отрасли / В. Г. Котух, Ю. В. Пахомов // Радиотехника: всеукр. межвед. науч.-техн.

сб. – Харків: ХНУРЕ, 2015. – № 182. – С. 65-72 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Google Scholar, НБУВ, eLIBRARY.RU).

24. Пахомов Ю. В. Исследование распределения тепловых потоков при импульсной лазерной сварке корпусов датчиков для газового оборудования и трубопроводных систем / М. А. Мирошник, В. Г. Котух, Ю. В. Пахомов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2014. – № 5. – С. 96-101 (Реферується або індексується міжнародними базами НЕБ Elibrary.ru, РИНЦ, IAC, Science index).

25. Пахомов Ю. В. Технологическая концепция создания АСУ ТП для объектов энергоснабжения на базе цифровых распределенных систем / М. А. Мирошник, В. Г. Котух, Ю. В. Пахомов // Радиотехника: всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Харків: ХНУРЕ, 2014. – № 179. – С. 131-137 (Реферується або індексується міжнародними базами Google Scholar, НБУВ, Elibrary.ru).

26. Пахомов Ю. В. Методы расчета упругих элементов мембранно-балочного типа в датчиках для газового оборудования и трубопроводных систем / Ю. В. Пахомов // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014. – № 116. – С. 64-66 (Реферується або індексується міжнародними наукометричними базами Google Scholar, WorldCat, DOAJ, НБУВ).

АНОТАЦІЯ

Пахомов Ю. В. Моделі та методи тестопридатного проектування критичних систем логічного управління на основі кінцевих автоматів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи і компоненти. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2019.

Дисертація присвячена розробці моделей та методів автоматизованого проектування та діагностування автоматних систем логічного управління на ПЛІС з використанням мов опису апаратури. Запропоновано розширення вхідного алфавіту кінцевого автомата шляхом введення додаткового стовпця в таблицю переходів-виходів автомата та додаткового входу в схемну реалізацію керуючого автомата. Удосконалено процедури проведення діагностичного експерименту з використанням синхронізуючих послідовностей. Удосконалено методи побудови апаратних пристроїв діагностування, що реалізують стратегію обходу всіх станів або дуг графа переходів керуючого автомата шляхом імітації алгоритму роботи операційного автомату в системі логічного управління. Модифіковано методи розрахунку тестопридатності кінцевих автоматів, керованості, спостережуваності та досяжності вершин (станів) у графах переходів керуючих автоматів. Запропоновано новий підхід при автоматизованому проектуванні тестопридатних кінцевих автоматів за рахунок побудови моделей мовами опису апаратури (HDL-моделей) у яких додаткові переходи реалізуються шляхом додавання умовних операторів у опис функцій

переходів і автоматного шаблону мовою опису апаратури VHDL.

Розроблені HDL-описи моделюються та синтезуються інструментальними засобами систем автоматизованого проектування цифрових пристроїв на технологічній платформі ПЛІС.

Розроблені процедури розрахунку тестопридатності кінцевих керуючих автоматів дозволили оптимізувати створення додаткових переходів в моделях автоматів за рахунок обчислення оцінок по Квайну синтезованих моделей автоматів.

Розроблено програмний модуль з візуальним інтерфейсом для введення графа переходів керуючого автомата та автоматизованої побудови тестопридатних HDL-моделей автоматів у формі автоматного шаблону у синтезованій підмножині мови опису апаратури VHDL.

Ключові слова: критична система, керуючий автомат, проектування, діагностування, тестопридатність, апаратурні витрати, мови опису апаратури, САПР ПЛІС.

АННОТАЦІЯ

Пахомов Ю. В. Модели и методы тестопригодного проектирования критических систем логического управления на основе конечных автоматов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена разработке моделей и методов автоматизированного проектирования и диагностирования автоматных систем логического управления на ПЛІС с использованием языков описания аппаратуры. В диссертации поставлены и решены следующие задачи: определить особенности диагностирования критических аппаратных систем логического управления; усовершенствовать процедуры организации неразрушающих диагностических экспериментов для моделей конечных автоматов; предложить методы построения аппаратных систем путем проведения диагностических экспериментов в автоматных системах управления; модифицировать методы оценки тестопригодности графовых моделей конечных автоматов; разработать методы повышения тестопригодности моделей конечных автоматов за счет расширения входного алфавита; реализовать разработанные модели в программных модулях построения тестопригодных автоматов в САПР ПЛІС.

Впервые предложено расширение входного алфавита конечного автомата за счет введения дополнительного столбца в таблицу переходов-выходов автомата, что существенно сократило длину и время диагностического эксперимента за счет возможности установки автомата в произвольное состояние. Усовершенствованы процедуры проведения диагностического эксперимента с использованием синхронизирующих последовательностей,

которые в отличие от существующих, позволили проводить неразрушающие диагностические эксперименты даже для автоматов с неисправностями функций переходов. Усовершенствованы методы построения аппаратных устройств диагностирования, реализующих стратегию обхода всех состояний или дуг графа переходов управляющего автомата, которые в отличие от существующих, позволяют проводить диагностические эксперименты, не нарушая основного режима работы критической системы логического управления на длительное время. Модифицированные методы расчета тестопригодности конечных управляющих автоматов, позволили минимизировать дополнительные аппаратные затраты при построении легкотестируемых цифровых автоматов.

Практическая реализация приведенной методики позволила строить тестопригодные модели конечных автоматов на языках описания аппаратуры САПР РЭП с использованием шаблонов автоматного программирования, а процедуры расчета тестопригодности конечных управляющих автоматов позволили оптимизировать создание дополнительных переходов в моделях автоматов. Это позволило уменьшить аппаратные затраты при построении легкотестируемых управляющих автоматов. Также разработан программный модуль с визуальным интерфейсом для автоматизированного проектирования тестопригодных HDL-моделей конечных управляющих автоматов. Программный модуль реализован в виде облачного сервиса. Практическая значимость научных исследований подтверждается разработкой моделей и методов автоматизированного проектирования и диагностирования тестопригодных цифровых систем логического управления на основе конечных автоматов.

Результаты диссертации отражены в 26 печатных работах, среди которых 1 монография, 13 статей в научных журналах из Переліку наукових фахових видань України, 3 статті в міжнародних наукових журналах за кордоном, 5 статей входят до міжнародної наукометричної бази Scopus; 1 стаття – Web of Science; 9 материалов международных научных конференций (из них 3 за рубежом и 2 входят в наукометрическую базу Scopus). Соискателю принадлежат 6 публикаций в наукометрической базе Scopus и индекс Хирша $h = 1$.

Ключевые слова: критическая система, управляющий автомат, проектирование, диагностирование, тестопригодность, аппаратные затраты, языки описания аппаратуры, САПР ПЛИС.

ABSTRACT

Pahomov Yu. V. Models and methods for the testable design of critical systems of logic control based on finite-state machines. – On the 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, 2019.

The PhD thesis is devoted to the development of models and methods of computer-aided design and diagnosis of automaton logic control systems on FPGA using hardware description languages. The extension of the input alphabet of the finite

state machine is proposed by introducing an additional column into the table of transitions-outputs of the automaton and an additional input to the circuit implementation of the control automaton. The procedures for performing a diagnostic experiment are improved through the use of synchronization sequences. The methods for developing hardware diagnostics devices have been improved; they implement a strategy for bypassing all the states or arcs of the transition graph of a control automaton by simulating the algorithm of an operational automaton in a logical control system.

The methods for calculating the testability of finite state machine, controllability, observability and the reachability of nodes (states) of a transition graph of control automata have been improved. A new approach to computer-aided design of testable finite state machines has been proposed, based on the use of hardware description languages for describing models (HDL models), in which additional transitions are implemented by adding conditional statements to the VHDL description of transition functions and automaton pattern. The developed HDL descriptions are simulated and synthesized by computer-aided design tools based on the FPGA technology platform.

The developed procedures for calculating the testability of the control automaton made it possible to optimize of entering additional transitions in automaton models through calculating the Quine estimate of the synthesized automaton models.

A software module has been developed; it has GUI for creating the transition graph of the control automaton and automating the construction of testable HDL models of automata in the form of automaton pattern in a synthesized subset of the VHDL language.

The research results obtained in the course of the research are reliable, which is confirmed by the experiments carried out to verify the proposed models and methods for monitoring and controlling gas supply systems.

The results of the thesis are reflected in 26 publications: 1 monograph, 13 articles that are included in the "Lists of scientific professional editions of Ukraine", 3 articles in international scientific journals abroad (5 of them in the international scientific database Scopus, 1 in the international scientific database Thomson Reuters Web of Science); 9 publications at international scientific conferences (3 of them are abroad, 2 are part of the scientific databases Scopus and IEEE Xplore).

The applicant has 6 publications included in the Scopus Science Center, and has the Hirsch index $h = 1$.

Key words: critical system, control finite state machine, design, diagnosis, testability, hardware costs, hardware description languages, CAD FPGA.

Підп. до друку 13.02.19. Формат 60x84/16. Папір друк.; Умов. друк. арк. 0,9
Облік. вид. арк. 1,0. Зам. № б/н; Тираж 100 прим.
Надруковано у видавництві ЧП “Степанов В.В.”
61168, Харків, вул. Акад. Павлова, 311