

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

КУЛАНОВ ВІТАЛІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 004.052:519.713:004.436.2

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РОЗРОБКИ ВІДМОВОСТІЙКИХ СИСТЕМ НА ПЛІС З
АВТОМАТНО-МОВНОЮ ДИВЕРСНІСТЮ**

Спеціальність 05.13.05 – комп’ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі комп'ютерних систем та мереж Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут" Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Харченко Вячеслав Сергійович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут",
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Фурман Ілля Олександрович,
Харківський національний технічний університет сільсько-
го господарства ім. Петра Василенка,
завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

кандидат технічних наук, доцент
Мірошник Марина Анатоліївна,
Українська державна академія залізничного транспорту,
доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем

Захист відбудеться "20" грудня 2012 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої 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" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий "16" листопада 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



І.Г. Ліберг

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Розвиток сучасної елементної бази програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) дає можливість розробнику створювати складні проектні рішення. Поява нової концепції «система на кристалі» (System-On-Chip, SoC), що передбачає інтеграцію в одній ПЛІС як можна більшої кількості компонентів обчислювальної системи, має свої переваги: збільшення швидкодії, підвищення достовірності даних, що передаються або отримуються, гнучкість проектування та масштабованість.

Завдяки своїм перевагам ПЛІС інтенсивно використовуються в системах критичного застосування (системах керування та захисту реакторів, аерокосмічних системах, медичному обладнанні та ін.), тобто таких системах, до яких висувуються особливі вимоги до забезпечення надійності, функціональної безпеки та живучості.

Однією з проблем функціонування критичних систем при традиційному дублюванні або мажоритуванні каналів є можливість їх відмови за загальною причиною, яка може бути обумовлена:

- невірною інтерпретацією специфікації (алгоритму);
- проектними дефектами, внесеними на етапах розробки й невиявленими на етапах тестування та відлагодження;
- зовнішніми впливами фізичного або інформаційного середовища.

Мінімізувати відмови даного типу, в більшості випадків, можливо за рахунок внесення версійної надмірності. Вимога щодо використання версійної надмірності є нормативною для багатьох типів систем, зокрема, систем аварійного захисту реакторів АЕС, деяких авіаційних комплексів. Для цього застосовують багатOVERсійний підхід до проектування, принцип диверсності або різноманітності, сутність якого полягає в розробці та виборі кількох (двох або більше) варіантів реалізації (версій) системи, з множини можливих, згідно з визначеними критеріями.

Суттєвий внесок у розвиток теорії і практики створення надійних цифрових систем та засобів їх технічної діагностики внесли: Т. Андерсон, А. Авіженіс, Л.В. Дербунович, О.В. Дрозд, А.І. Кривоносов, Г.Ф. Кривуля, О.М. Романкевич, Б. Рендел, Ю.О. Скобцов, І.О. Фурман, В.С. Харченко, В.І. Хаханов та ін. Проблеми синтезу цифрових автоматів, у тому числі на програмованій логіці, були досліджені у наукових працях таких вчених, як Р. Міллер, Д.О. Поспелов, М. Уїлкс, В.М. Глушков, С.І. Баранов, О.О. Баркалов, А.О. Мельник, В.М. Опанасенко та ін.

Аналіз досягнень в області забезпечення відмовостійкості та створення багатOVERсійних систем на ПЛІС показує, що:

- відомі методи внесення версійної надмірності під час багатOVERсійної розробки систем критичного застосування на ПЛІС не враховують розмаїття автоматних моделей і мов опису апаратури на етапах життєвого циклу (ЖЦ);
- існуючий експертний підхід до оцінювання варіантів реалізацій проектних рішень на ПЛІС на різних етапах ЖЦ не є достатньо формалізованим і має суттєву експертну складову;
- на сьогоднішній день відомо багато прикладів реалізації проектів комбінаційних і послідовних автоматів з використанням принципу диверсності, однак, відсутній загальний метод синтезу багатOVERсійних систем на ПЛІС, розробка яких

здійснюється, в тому числі, з використанням множини моделей і мов опису апаратури.

Таким чином, **актуальною науковою задачею** є розробка методів і засобів створення відмовостійких багатoversійних систем на програмованій логіці шляхом використання принципів автоматно-мовної диверсності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі комп'ютерних систем та мереж Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського "ХАІ" в рамках завдань фундаментальних держбюджетних НДР МОН України та міжнародних проектів:

– "Теоретичні основи, методи та інструментальні засоби аналізу, розробки і верифікації гарантоздатних інформаційно-управляючих систем для аерокосмічних об'єктів і комплексів критичного застосування" (Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "ХАІ", Д503–45/2006, № 0106U001071, 2006-2008 рр.);

– "Теоретичні основи, методи та технології забезпечення гарантоздатності еволюціонуючих комп'ютеризованих інфраструктур для аерокосмічних і критичних об'єктів" (Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "ХАІ", Д503–17/2009, № 0108U010994, 2009-2011 рр.);

– Проект Європейського Союзу TEMPUS-MASTAC (JEP_26008_2005) "Технологія підготовки спеціалістів з критичного комп'ютерингу" (2006-2008 рр.);

– Проект Європейського Союзу SAFEGUARD 158886-TEMPUS-1-2009-1-UK-TEMPUS-JPCR "Національна мережа центрів інноваційної університетсько-індустріальної кооперації з інженерії безпеки" (2010-2013 рр.).

Роль здобувача в зазначених науково-дослідних темах і проектах, у яких дисертант був безпосереднім виконавцем, полягає у створенні методів і засобів розробки багатoversійних систем на ПЛІС з використанням принципів автоматно-мовної диверсності.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – підвищення надійності цифрових систем на ПЛІС шляхом використання принципів автоматно-мовної диверсності.

Для досягнення поставленої мети поставлені наступні задачі:

– провести аналіз існуючих методів і засобів забезпечення відмовостійкості систем на ПЛІС в процесі їх розробки й застосування з урахуванням вимог щодо використання принципу диверсності;

– удосконалити моделі багатoversійних цифрових автоматів на основі деталізації їх канонічних і мікропрограмних структур;

– проаналізувати процес розробки та вдосконалити модель життєвого циклу багатoversійних систем на ПЛІС;

– розробити метод синтезу багатoversійних цифрових автоматів на ПЛІС з використанням автоматно-мовної диверсності;

– удосконалити методи оцінки надійності та диверсності багатoversійних цифрових автоматів на ПЛІС;

– розробити та впровадити методи та інструментально-технічні засобів підтримки процесів синтезу та оцінки варіантів цифрових систем на ПЛІС.

Об'єкт дослідження – процеси розробки та оцінювання надійності цифрових систем на ПЛІС, багатoversійні системи на ПЛІС критичного застосування.

Предмет дослідження – моделі процесів розробки, методи синтезу і оцінювання надійності багатoversійних систем на ПЛІС при використанні автоматно-мовної диверсності.

Методи дослідження. Методологія досліджень базується на принципах системного аналізу і синтезу цифрових систем – під час розробки моделей життєвого циклу багатoversійних систем на ПЛІС; методи теорії скінчених автоматів і HDL-мов – під час розробки моделей багатoversійних канонічних та мікропрограмних автоматів та методу їх синтезу; методи теорії надійності та технічної діагностики, а також статистичного моделювання – під час розробки методу оцінки багатoversійних цифрових автоматів на ПЛІС.

Наукова новизна одержаних результатів:

1) *вперше* розроблено метод синтезу багатoversійних цифрових автоматів на ПЛІС з автоматно-мовної диверсністю. Даний метод, на відміну від відомих, базується на спільному використанні різних автоматних моделей і мов опису апаратури, що забезпечує підвищення надійності внаслідок зниження ймовірності відмови за загальною причиною;

2) *удосконалено* моделі багатoversійних цифрових автоматів на основі розробки їх канонічних і мікропрограмних структур і варіантів внесення надмірності, що дозволяє розширити множину рішень в процесі синтезу цифрових систем і забезпечити стійкість до фізичних і проектних дефектів;

3) *удосконалено* модель життєвого циклу багатoversійних систем на ПЛІС шляхом врахування різних варіантів використання автоматної та мовної диверсності, що дозволяє сформулювати множину алгоритмів синтезу та здійснити вибір версій за критерієм надійності;

4) *дістав подальшого розвитку* метод оцінки диверсності багатoversійних систем на ПЛІС за рахунок використання спеціальних процедур внесення та аналізу впливу фізичних й проектних дефектів, що дозволяє розрахувати метрики диверсності і використовувати їх для вибору варіантів реалізації резервних каналів.

Практичне значення одержаних результатів в галузі розробки багатoversійних систем критичного застосування полягає в тому, що на підставі проведених досліджень і запропонованих методів:

- розроблено методики та інструментальні засоби аналізу версій;
- сформульовано пропозиції щодо розрахунку показників диверсності, що дає змогу формалізувати процес створення багатoversійних систем в частині вибору проектних рішень за критерієм надійності.

Результати досліджень впроваджено у:

- НТСКБ “Полісвіт” Державного науково-виробничого об'єднання “Комунар” (м. Харків) в процесі розробки підсистеми управління системою протизаморожувача літака Ан-140 НТСКБ “Полісвіт”.

- Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського “ХАІ” при викладанні навчальних курсів “Автоматизоване проектування комп'ютерних систем”, “Прикладна теорія цифрових автоматів”, а також при виконанні міжнарод-

них проектів TEMPUS-MASTAC JEP_26008_2005 “Розробка магістерських та аспірантських курсів з критичного комп’ютерингу” (2006-2009 рр.); SAFEGUARD 158886-TEMPUS-1-2009-1-UK-TEMPUS-JPCR “Національна мережа інноваційної університетської та промислової кооперації з інженерії безпеки” (2010-2013 рр.).

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові положення, результати, висновки і рекомендації отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка концепції створення систем на ПЛІС з використанням мови опису апаратури JHDL в рамках багатoversійного підходу; розробка моделі життєвого циклу багатoversійних ПЛІС-проектів з автоматно-мовною диверсністю; розробка методу і уніфікованої середовища перехресного тестування в рамках багатoversійного підходу до проектування систем на ПЛІС; розробка методу тестування та верифікації проектів на ПЛІС з використанням компонентів візуалізації; концепція побудови та оцінки ПЛІС-проектів при використанні внутрішньої мовної диверсності; розробка методу параметризації IP-інфраструктур для відмовостійких проектів на ПЛІС; розробка інструментального засобу засіву та моделювання константних несправностей вбудованих систем на ПЛІС; розробка інструментального засобу профілювання та засіву HDL-дефектів в проектах на ПЛІС. Постановка задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувався здобувачем спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, ідеї, висновки дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях і симпозиумах: Міжнародна науково-практична конференція “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України” (м. Харків, 2007 р., 2008 р.); Міжнародна науково-практична конференція “Інформаційні комп’ютерні технології в машинобудуванні” (м. Харків, 2006-2009 р.); Міжнародний симпозиум “IEEE East-West Design and Test International Symposium” (Ереван, Армєнія, 2007 р.; Москва, Росія, 2009 р.; Севастополь, Україна, 2011 р.), Міжнародна науково-технічна конференція “Dependable Systems, Services and Technologies” (Кіровоград, Україна, 2007 р., 2008 р., 2010 р.). Наукові результати роботи доповідалися також на науково-технічному семінарі “Критичні комп’ютерні технології та системи”, що проводиться на кафедрі комп’ютерних систем і мереж Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського “ХАІ”.

Публікації. Результати наукових досліджень відображені у 13 публікаціях, в тому числі: 6 праць у фахових наукових виданнях України, 3 статті у збірниках праць НТК та 4 тези доповідей на конференціях.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури й додатків. Загальний обсяг дисертації складає 235 сторінки; з них 59 рисунків за текстом; 5 рисунків на 5 окремих сторінках; 19 таблиць за текстом; 4 таблиці на 5 окремих сторінках; списку використаних літературних джерел з 122 найменувань на 13 сторінках; 7 додатків на 56 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ дисертаційної роботи містить: обґрунтування актуальності теми й наукових задач; інформацію про зв’язок роботи з науковими програмами; мету й задачі дослідження; об’єкт, предмет і методи дослідження; характеристику наукової новиз-

ни й практичного значення отриманих результатів, а також особистого внеску здобувача; дані щодо реалізації, апробації та публікації результатів.

У **першому розділі** досліджено методи, технологія та засоби розробки відмовостійких систем на базі мікросхем програмованої логіки. Проведено аналіз нормативної бази вимог до критичних систем, продуктів їх життєвого циклу, а також проблеми розробки та оцінки багатoversійних систем на ПЛІС. Досліджено існуючі багатoversійні моделі цифрових автоматів.

Встановлено, що:

- до критичних систем висуюають особливі вимоги щодо мінімізації відмов через загальні причини з використанням принципу багатoversійності. При цьому більшість з цих вимог зафіксовані у міжнародних стандартах та галузевих нормативно-правових документах;

- існуючі моделі багатoversійних цифрових автоматів орієнтовані на рішення конкретних вузькоспеціалізованих задач, що накладає низку обмежень на їх використання для вирішення іншого класу задач і потребує додаткових доопрацювань з боку розробника;

- з точки зору кількісної та якісної оцінки варіантів реалізацій версій – відсутній об'єктивний механізм прийняття рішень, що дозволив би прискорити процес вибору варіантів рішень згідно із заданими критеріями;

- відсутня технологія синтезу багатoversійних систем на ПЛІС для отримання (генерації) альтернативних версій з максимальним ступенем диверсності. Відсутні рекомендації з налагодження існуючих засобів синтезу САПР, які в явному вигляді не підтримують синтез багатoversійних систем.

Сформульована загальна наукова задача дисертаційної роботи, яка декомпозується на часткові задачі, що базуються на розробці: принципів автоматно-мовної диверсності для створення багатoversійних систем на ПЛІС; моделей багатoversійних цифрових автоматів; методу синтезу багатoversійних цифрових автоматів в рамках автоматно-мовної диверсності; методу оцінки багатoversійних цифрових автоматів та інструментальних засобів, які дозволяють автоматизувати процес отримання чисельних значень метрик диверсності. Обґрунтовано методіку досліджень.

Другий розділ дисертації присвячено розробці принципу автоматно-мовної диверсності при побудові багатoversійних систем на ПЛІС та вдосконаленню моделей багатoversійних цифрових автоматів.

Під *автоматно-мовною диверсністю* запропоновано розглядати такий вид надмірності, який досягається шляхом застосування множини різноманітних моделей багатoversійних цифрових автоматів, а також множини різноманітних мов опису апаратури (та їхніх ресурсів) на етапах розробки відмовостійких багатoversійних цифрових систем критичного застосування на ПЛІС. Таким чином, формування множини проектних рішень $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, які представлені множиною моделей БВЦА $U_{БВЦА} = \{u_{БВЦА1}, u_{БВЦА2}, \dots, u_{БВЦАn}\}$, здійснюється шляхом поєднання множини одноверсійних моделей цифрових автоматів $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, та мов опису апаратури $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ (рис. 1).

Автоматна диверсність визначає структуру багатoversійної системи (БВС), *мовна диверсність* – описує її в термінах мов опису апаратури для подальшого синтезу засобами САПР.

Таким чином, під *автоматною диверсністю* запропоновано розглядати такий вид багатoversійності, який досягається за рахунок внесення надмірності на рівні множини автоматних моделей реалізації багатoversійних систем на ПЛІС.

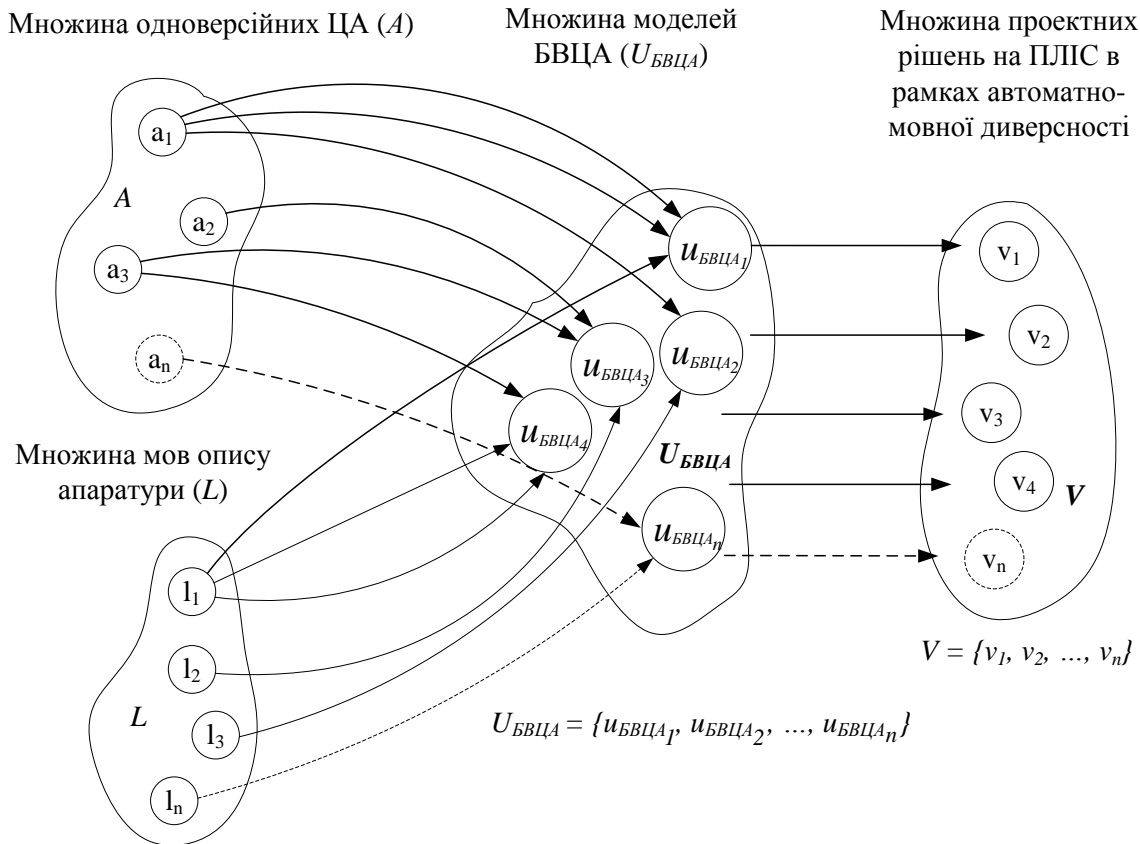


Рис. 1. Формування проектних рішень для багатoversійних систем на ПЛІС з використанням принципів автоматно-мовної диверсності

Відповідно до наданих класифікаційних ознак в роботі досліджено існуючі рівні та види автоматної диверсності, розроблена *модель абстрактного БВЦА* (рис. 2), яка визначена наступним чином

$$A_{\text{МВЦА}} = \{\{A_i\}_{i=1}^n, Z, \psi, W_t, s_0, t\}, \quad (1)$$

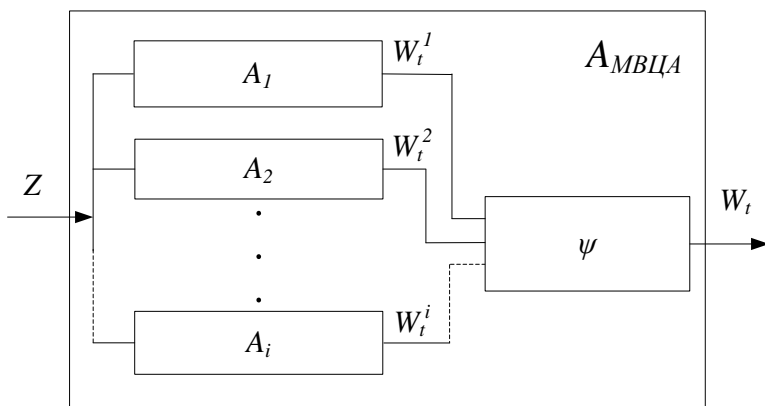


Рис. 2. Загальна структура БВЦА

де $\{A_i\}_{i=1}^n$ – множина моделей одноверсійних ЦА (версії реалізації системи) у складі БВЦА, $i = \overline{1, n}, n \geq 2$; ψ – функція формування результатів роботи версій (каналів); W_t – вихідний алфавіт БВЦА, який формується функцією ψ на підставі вихідних даних кожного з каналів W_t^i , тобто $W_t = \psi(W_t^i)$; s_0 – початковий стан БВЦА; t – дискретний авто-

матний час ($t = 1, 2, 3, \dots$), який визначає моменти переходу автомата з одного стану в інший.

Автомат, що описується моделлю (1) має наступні властивості.

1. БВЦА відноситься до класу кінцевих цифрових автоматів.
2. Функція ψ представлена комбінаційним автоматом, або автоматом з пам'яттю, якщо існує необхідність в додатковій синхронізації роботи каналів.
3. Всі одноверсійні моделі A_i в складі БВЦА відносяться до класу еквівалентних, тобто мають однаковий вхідний Z і вихідний W алфавіт; їх реакції з вихідного стану на будь-яке вхідне слово збігаються.
4. Якщо A_i і A_j – відповідні одноверсійні моделі в складі багатOVERсійного цифрового автомату $A_{МВЦА}$, тоді: якщо $\varphi_i = \varphi_j$, тоді $\lambda_i = \lambda_j$; якщо $\varphi_i \neq \varphi_j$, тоді $\lambda_i \neq \lambda_j$.

Згідно абстрактної моделі БВЦА, а також рівнів та видів автоматної диверсності розроблено моделі цифрових автоматів двох класів – багатOVERсійного канонічного цифрового автомату і багатOVERсійного мікропрограмного цифрового автомату. Також надано загальні рекомендації щодо формування моделей багатOVERсійних цифрових автоматів.

Під мовною диверсністю запропоновано розглядати такий вид багатOVERсійності, який досягається за рахунок внесення надмірності на рівні множини різноманітних мов опису апаратури та/або ресурсів (мовних конструкція, стилів опису тощо) в рамках заданої мови при реалізації БВЦА на ПЛІС (рис. 3).

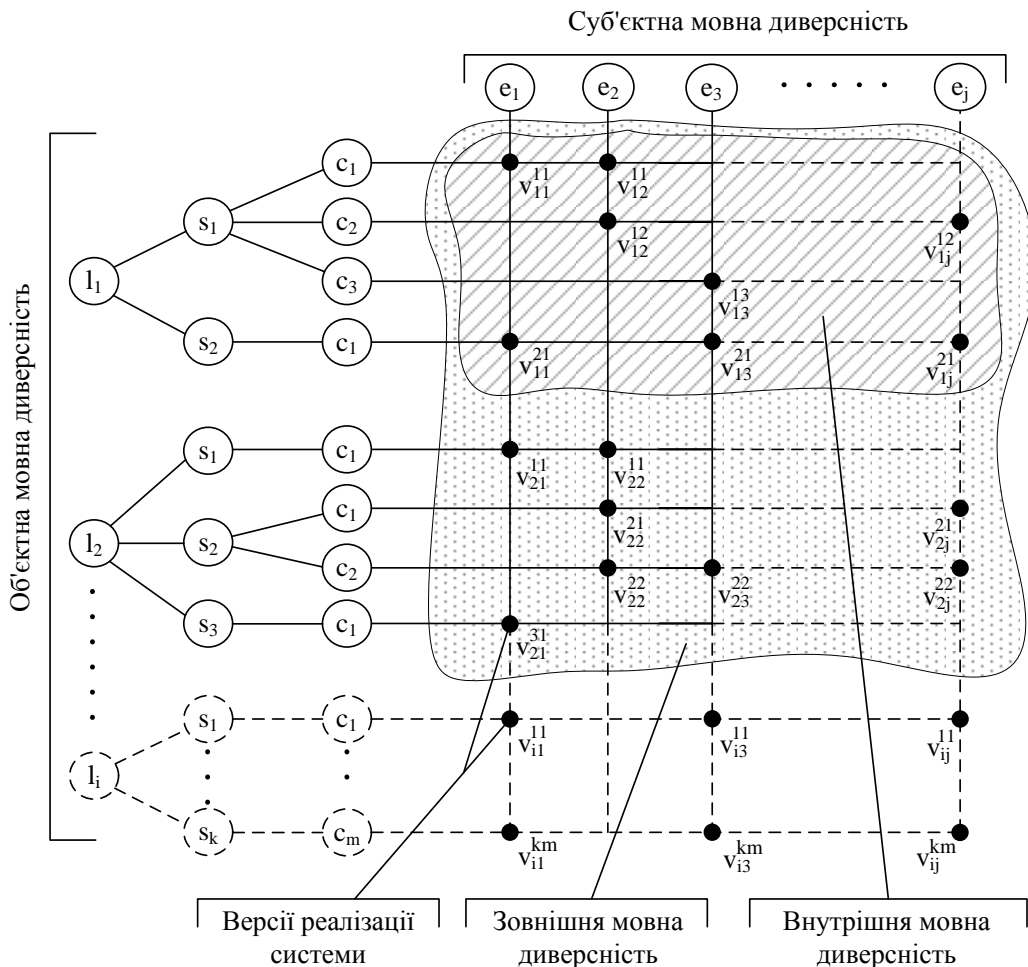


Рис. 3. Множина версій проектних рішень в рамках мовної диверсності

Тобто

$$\gamma = \langle L, E, S, C \rangle, \quad (2)$$

де $L = \{l_1, l_2, \dots, l_i\}$ – множина мов опису апаратури, $i = \overline{1, n}$; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_j\}$ – множина алгоритмів реалізації версій в рамках мови l_i опису апаратури, $e = \overline{1, n}$; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ – множина стилів опису проектів, які підтримуються l_i мовою опису апаратури, $k = \overline{1, n}$; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ – множина мовних конструкцій l_i мови опису апаратури, $m = \overline{1, n}$.

Таким чином, множина кортежів $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i\}$ визначає повну множину варіантів реалізації версій V в рамках мовної диверсності

$$V = \left\{ v_{l_1 e_1}^{s_1 c_1}, v_{l_1 e_2}^{s_1 c_1}, \dots, v_{l_1 e_2}^{s_1 c_2}, v_{l_1 e_1}^{s_2 c_1}, \dots, v_{l_2 e_1}^{s_1 c_1}, v_{l_2 e_2}^{s_1 c_1}, \dots, v_{l_2 e_1}^{s_1 c_2}, v_{l_2 e_2}^{s_2 c_1}, \dots, v_{l_i e_j}^{s_k c_m} \right\}, \quad (3)$$

де $v_{l_i e_j}^{s_k c_m}$ – версія реалізації системи в рамках мовної диверсності.

На основі розглянутих принципів автоматно-мовної диверсності повна множина проектних рішень багатоверсійних систем $V_{БВС}$ визначена як декартів добуток множини моделей БВЦА $U_{БВЦА} = \{u_{БВЦА1}, u_{БВЦА2}, \dots, u_{БВЦАn}\}$, які формуються з множини моделей одноверсійних цифрових автоматів $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ та множини варіантів версій, отриманих в рамках мовної диверсності $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i\}$, тобто (рис. 4)

$$V_{БВС} = \Gamma \times U_{МВЦА}. \quad (4)$$

У третьому розділі наведено результати вдосконалення моделей життєвого циклу (ЖЦ) багатоверсійних систем на програмованій логіці в частині врахування автоматно-мовної диверсності на етапах розробки. Запропоновано розглядати у вигляді N -рівневого графу (рис. 5):

$$G = \langle V, U \rangle, \quad (5)$$

де i – етап життєвого циклу БВС на ПЛІС $i = 1, \dots, N_i$, $N = 9$; j – вид версійної надмірності, $j = 1, \dots, M_j$; $V = \{v_{ij}\}$ – множина вершин (версій реалізації); $U = \{v_{i1j1}, v_{i2j2}\}$ – множина ребер графу, де кожне ребро визначається парою вершин, що з'єднуються; V_B – початкова вершина; V_E – кінцева вершина; M – кількість вершин графу G , де $M_1 \neq M_2 \neq \dots \neq M_i \neq \dots \neq M_N$.

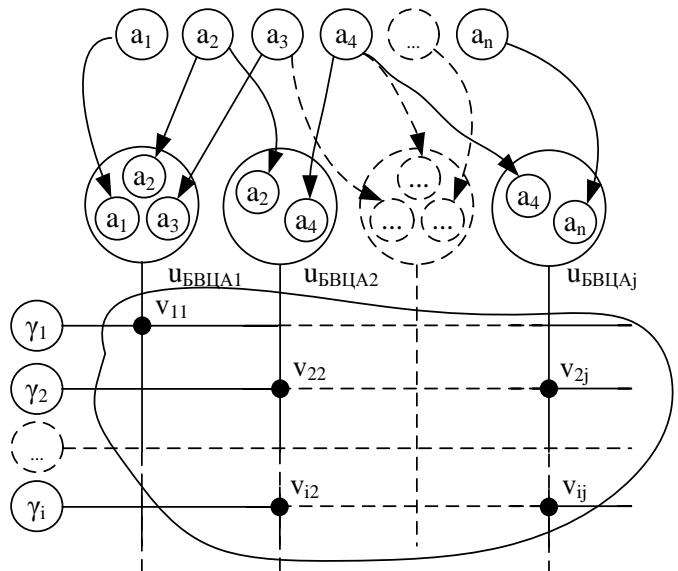


Рис. 4. Множина БВС в рамках автоматно-мовної диверсності

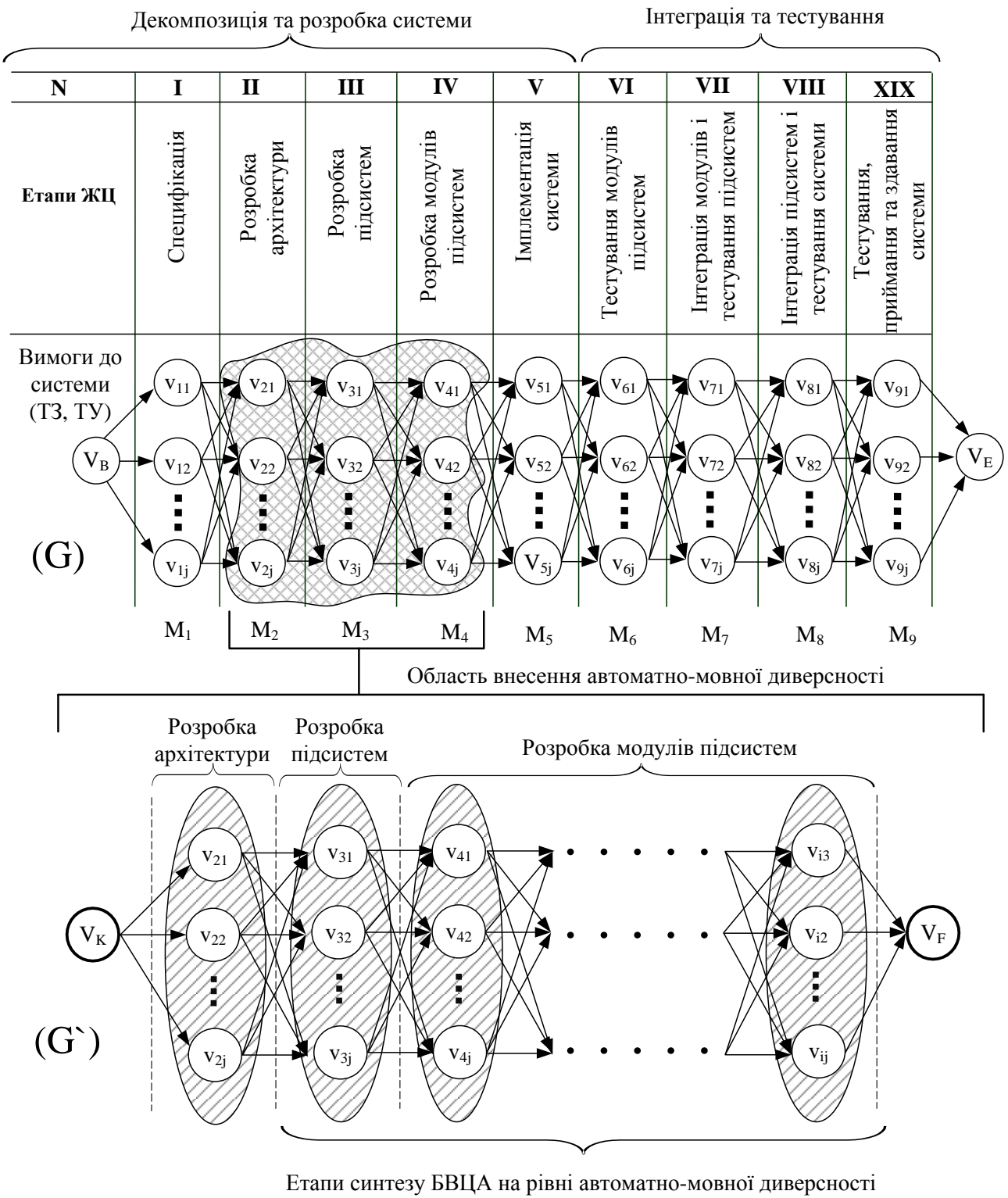


Рис. 5. Модель ЖЦ БВС на ПЛІС з автоматно-мовною диверсністю

Для наданого графу введено обмеження, яке пов'язане з можливістю використання версій i -го етапу з версіями етапу $i+1$. Отже матриця сумісності версій має наступний вигляд

$$Mx_{i,i+1} = \|\alpha_{i,i+1}^j\|. \quad (6)$$

Також слід зазначити, що етапи розробки підсистем, а також їх модулів запропоновано розглядати як етапи *синтезу багатOVERСІЙНИХ ЦИФРОВИХ АВТОМАТІВ*, представлених підграфом G' графа G , де $V' \subseteq V$ та $U' \subseteq U$. Отже *технологія синтезу багатOVERСІЙНИХ ЦИФРОВИХ АВТОМАТІВ* $MVTS$ визначено як множину шляхів у підграфі G' від початкової вершини V_K до кінцевої V_F

$$MVTS \sim \{L_p(V_K, V_F)\}. \quad (7)$$

Таким чином, *задача синтезу БВС на ПЛІС* в рамках автоматної диверсності було зведено до формування та вибору множини технологій синтезу канонічного цифрового автомату або мікропрограмного цифрового автомату з «жорсткою/програмованою» логікою управління (при мікропрограмному способі інтерпретації алгоритму). При цьому запропонований *метод розробки багатOVERСІЙНОЇ СИСТЕМИ* визначається наступними етапами: 1) абстрактний синтез; 2) структурний синтез; 3) синтез блоку контролю; 4) формування та вибір множини структурних моделей БВЦА. Перший та другий етапи в рамках багатOVERСІЙНОГО ПІДХОДУ розглянуто в роботі на прикладі моделей багатOVERСІЙНИХ канонічних автоматів (БВКА) різних класів. Таким чином, основними кроками під час *синтезу БВКА* визначено: 1) вибір множини методів завдання функцій переходів/виходів ЦА; 2) визначення множини методів і алгоритмів мінімізації станів ЦА; 3) вибір множини методів кодування внутрішніх станів і вхідного/вихідного алфавітів; 4) вибір множини елементів пам'яті; 5) вибір структурних моделей БВКА; 6) вибір множини методів мінімізації комбінаційних (схем) автоматів у складі БВКА; 7) вибір множини функціонально-повних базисів реалізації комбінаційних автоматів у складі БВКА.

Розроблено загальні принципи опису БВС на ПЛІС в рамках мовної диверсності на прикладі мов опису апаратури VHDL та Verilog.

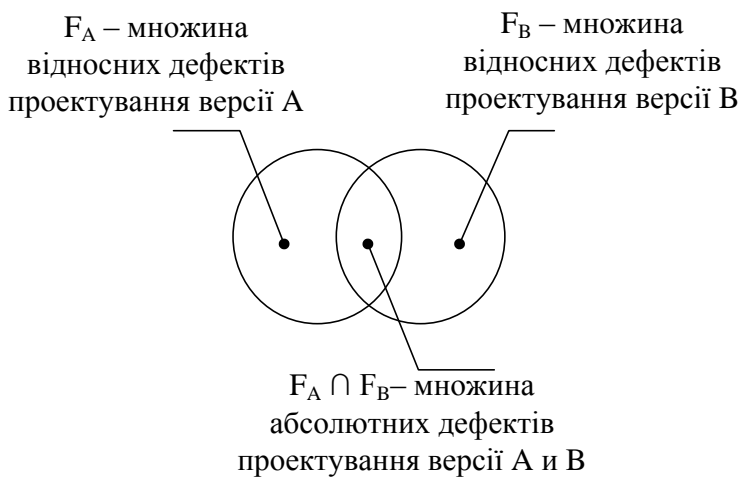
Проведено оцінку розроблених моделей багатOVERСІЙНИХ канонічних цифрових автоматів різних класів, де у якості основного параметру оцінки виступає показник надійності – ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$. Розрахунок ймовірності безвідмовної роботи запропоновано визначати на підставі отриманих для відповідної автоматної моделі структурної схеми надійності, яка визначається двома складовими для кожного з блоків БВЦА – це ймовірність безвідмовної роботи блоку при наявності *фізичних дефектів* $P^{ФД}(t)$ та *дефектів проектування* $P^{ДП}(t)$. При цьому клас дефектів проектування було поділено на *абсолютні* та *відносні дефекти*, де $P_i^{ДП}(t)$ визначено наступним чином

$$\begin{cases} P_i^{ДП}(t) = e^{-K_i^{ДП} \times \lambda_{ДП} \times t}, \\ \sum_{i=1}^N K_i^{ДП} = 1, \end{cases} \quad (8)$$

де $K_i^{ДП}$ – коефіцієнт пропорційності дефектів проектування відповідної i -ої множини абсолютних і відносних дефектів проектування першої та другої версії, де $0 < K_i^{ДП} < 1$, для двоверсійної реалізації $N = 3$; $\lambda_{ДП}$ – інтенсивність відмов блоку в

складі БВЦА для повної множини дефектів проектування. Примітка: для одноверсійної реалізації коефіцієнт пропорційності $K_i^{дп} = 1, N = 1$;

Коефіцієнт пропорційності $K_i^{дп}$ визначається наступним чином. Нехай A і B – версії реалізації блоків у складі БВЦА, де F_A і F_B – множина дефектів проектування першої та другої версії відповідно. Тоді повна множина дефектів проектування є об'єднанням двох заданих множин F_A і F_B , тобто $F_A \cup F_B = \{F_X / F_X \in F_A \vee F_X \in F_B\}$; множина абсолютних дефектів проектування є перетин даних множин, тобто $F_A \cap F_B = \{F_Y / F_Y \in F_A \wedge F_Y \in F_B\}$; множина відносних дефектів версій A і B є різницею двох множин $F_A \setminus F_B = \{F_H \in F_A / F_H \notin F_B\}$ та $F_B \setminus F_A = \{F_L \in F_B / F_L \notin F_A\}$ відповідно (рис. 6).



$$K_{AB}^{абс.дп} = \frac{|F_A \cap F_B|}{|F_A \cup F_B|};$$

$$K_A^{відн.дп} = \frac{|F_A \setminus F_B|}{|F_A \cup F_B|};$$

$$K_B^{відн.дп} = \frac{|F_B \setminus F_A|}{|F_A \cup F_B|}.$$

Рис. 6. Теоретико-множинна модель відмов двухверсійної системи через дефекти проектування

Згідно зі структурними схемами надійності для кожної з розроблених моделей БВКА проведено оцінку ймовірності безвідмовної роботи та отримано чисельні значення коефіцієнту підвищення надійності μ диверсних рішень по відношенню до одноверсійних

$$\mu = \frac{1 - P_{ОКА}(t)}{1 - P_{БВКА}(t)}, \quad (9)$$

де $P_{ОКА}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи одноверсійного канонічного автомату (класичне дублювання); $P_{БВКА}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи багатоверсійного (диверсного) канонічного автомату.

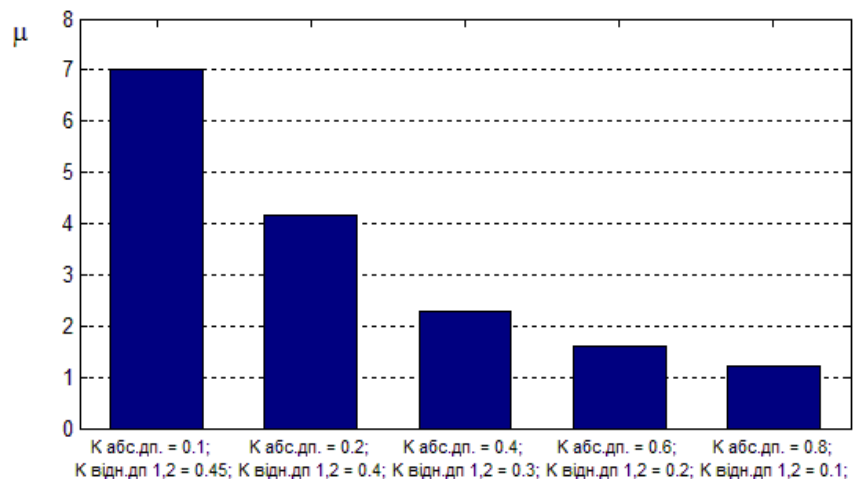


Рис. 7. Коефіцієнт підвищення надійності μ для БВКА Мілі класу А (Мура класу В) з повною загальною диверсністю по відношенню до одноверсійного рішення при множині значень $K^{абс.дп}$, $t = 1$ рік

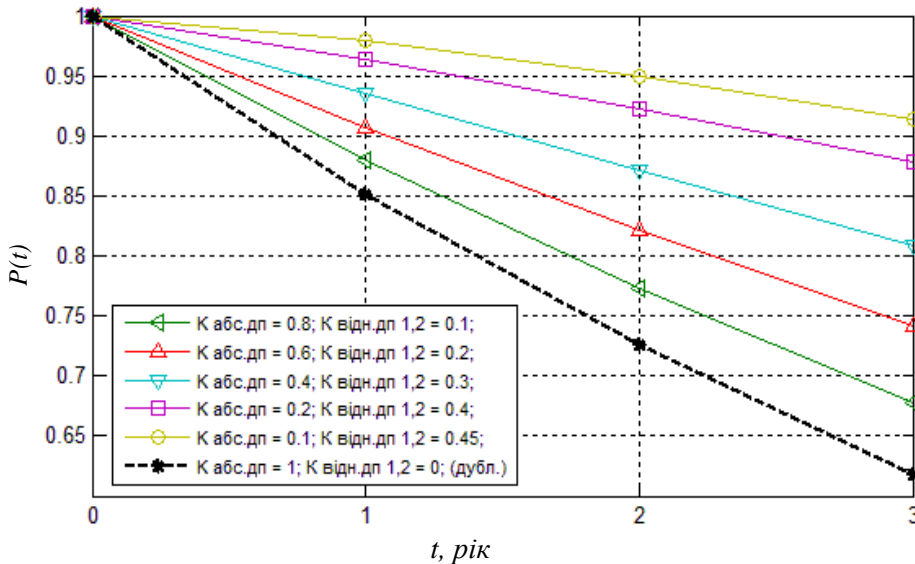


Рис. 8. Графік залежності ймовірності безвідмовної роботи БВКА Мілі класу А (Мура класу В) з повною загальною диверсністю від часу та різними значеннями коефіцієнта пропорційності дефектів проектування $K^{\text{абс.дп}}$

Отримані результати довели (рис. 7, 8), що використання автоматомовної диверсності дозволяє підвищити надійність цифрових систем на ПЛІС завдяки мінімізації відмов за загальною причиною навіть при значній кількості абсолютних дефектів проектування, тобто значеннях коефіцієнта пропорційності абсолютних дефектів проектування близьких $K^{\text{абс.дп}}$ до одиниці.

Для вибору варіантів версій реалізації та отримання чисельних значень ступеня різноманітності версій запропоновано розрахунок метрики диверсності проводити на двох рівнях – апаратний і програмний. При цьому оцінку диверсності зведено до ймовірнісної оцінки того, що не відбудеться відмова системи, тобто вихідний результат буде однаково невірним, при наявності дефектів у двох каналах (різних варіантах реалізації версій системи)

$$D = \sum_{(f_i, f_j)} P(f_i, f_j) d_{i,j}, \quad (10)$$

де $P(f_i, f_j)$ – ймовірність виникнення пари дефектів; $d_{i,j}$ – диверсність по відношенню до пари дефектів (f_i, f_j) , тобто ймовірність того, що при наявності пари дефектів у двох каналах, система не буде демонструвати однаково невірний результат.

Нехай поява всіх вхідних наборів, а також наявність всіх можливих пар дефектів, кількість яких дорівнює m , є рівноймовірною. Тоді з формули (10)

$$D = \frac{1}{m} \sum_{i,j} \left(1 - \frac{k_{i,j}}{2^n} \right), \quad (11)$$

де n – кількість вхідних портів; m – кількість пар можливих дефектів; $k_{i,j}$ – кількість вхідних тестових наборів (з множини можливих), які виявляють пару дефектів в обох каналах системи.

На основі метрик диверсності було запропоновано методику їх розрахунку для апаратного та програмного рівнів.

Отже на *апаратному рівні*, де у якості дефекту розглядається модель константної несправності визначено наступні етапи: 1) отримання відповідних версій реалізації системи в форматі EDIF 2.0.0; 2) формування повної множини пар дефектів; 3) формування повної множини вхідних наборів; 4) внесення повної множини пар дефектів та моделювання відповідної пари версій на повній множині вхідних наборів; 5) отримання чисельних значень метрики D .

На *програмному рівні* (рівень HDL-опису) алгоритм розрахунку метрики диверсності визначено наступним чином (рис. 9): 1) формування загального профілю HDL-дефектів F , котрий включає повну множину типів дефектів проектування f_i , $F = \{f_1, f_2, \dots, f_i\}$, $i = \overline{1, n}$; 2) на основі статичного аналізу вихідного коду відповідних HDL-описів отриманих версій v_k ($v_k \in V$), де k – кількість версій, $k = \overline{1, m}$, формується загальний профіль дефектів, тобто визначається підмножина типів дефектів F' , де $F' \subseteq F$, $\forall f_i \in F' : f_i \in F$; 3) з використанням процедури “засіву дефектів”, а також згідно зі сформованим профілем F' для кожної версії HDL-опису v_k , генерується повна множина V' “дефектних” варіантів v'_{k_j} ($v'_{k_j} \in V'$), де j – кількість можливих дефектів в рамках заданих типів f_i ; 4) моделювання сформованої множини пар “дефектних” варіантів $\Omega = \langle v'_{k_j}, v'_{k+1_j} \rangle$ на повній множині вхідних наборів; 5) отримання чисельних значень метрики D .

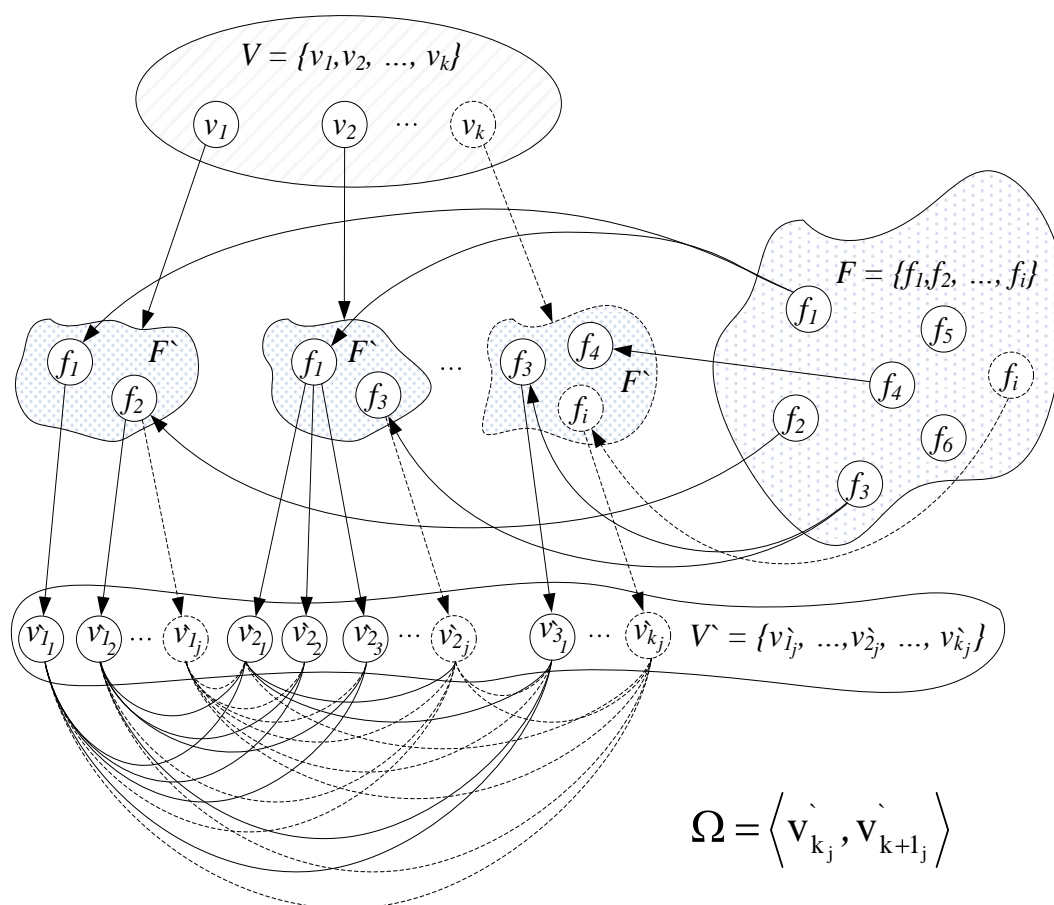


Рис. 9. Графічна ілюстрація процедури розрахунку метрики диверсності відповідних версій реалізації системи на рівні мов опису апаратури

Згідно з отриманими чисельними результатами розрахунку метрик диверсності (на апаратному та програмному рівнях) надані загальні рекомендації щодо формування найбільш різноманітних (диверсних) варіантів пар реалізації версій системи.

У **четвертому розділі** викладено експериментальну та прикладну частини досліджень по створенню багатоверсійних цифрових систем на ПЛІС з використанням принципів автоматно-мовної диверсності. Процес розробки, оцінки та вибору варіантів структур БВЦА було запропоновано поділити на етапи та розглянути у вигляді діаграми в нотації IDEF0 (рис. 10). Отже основними етапами розробки БВС з автоматно-мовною диверсністю визначено: аналіз вимог до системи, вибір моделі ЦА, синтез моделі БВЦА, оцінка варіантів реалізації БВЦА та вибір відповідного БВЦА з множини отриманих.

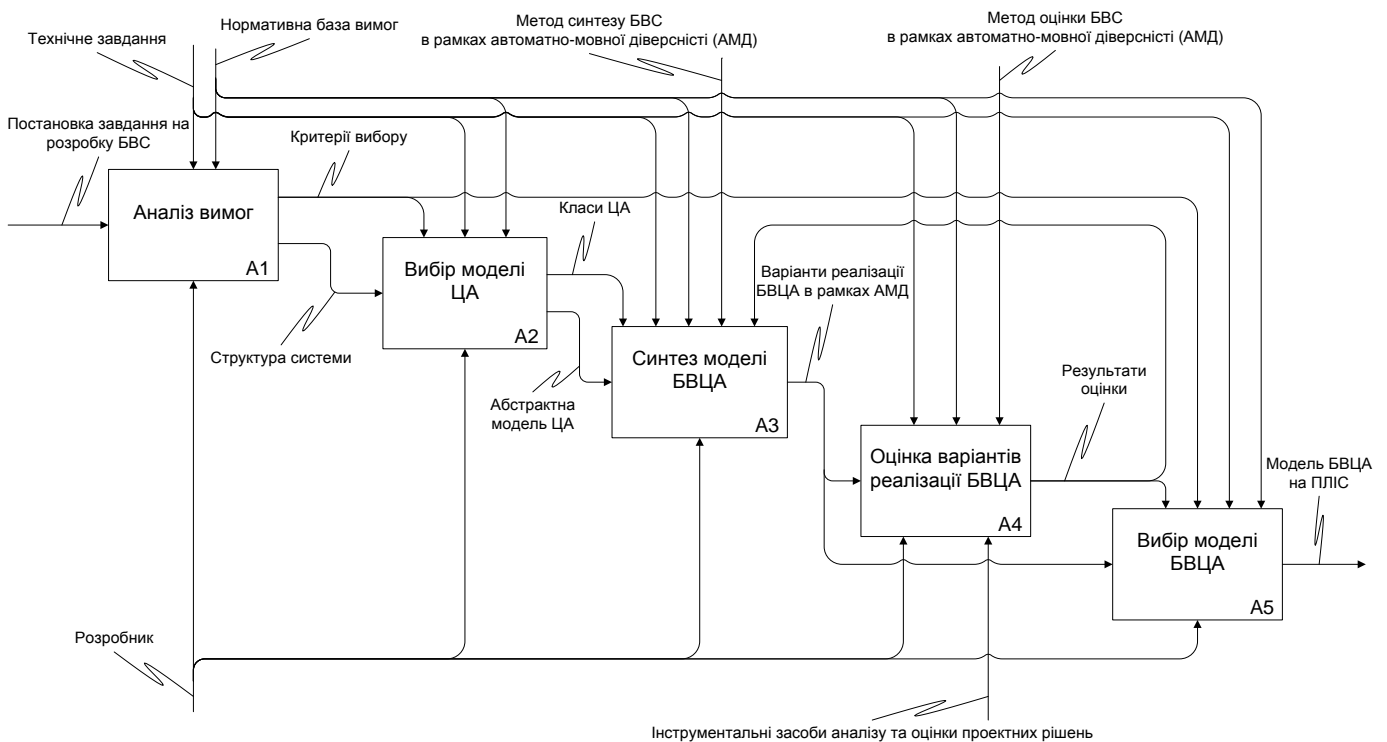


Рис. 10. Діаграма декомпозиції першого рівня процесу розробки БВС на ПЛІС

На базі запропонованих методів оцінки ступеня різноманітності варіантів реалізації версій БВС (або блоків у складі БВЦА) було розроблено алгоритми та програмно-технічні засоби автоматизації отримання чисельних показників диверсності.

Інструментальний засіб JFITool дозволяє вносити дефекти та моделювати проектні рішення на ПЛІС, де у якості моделі дефектів обрано модель константної несправності. Для оцінки диверсності версій БВС на рівні мов опису апаратури розроблено інструментальний засіб профілювання та "засіву" HDL-дефектів на рівні мови опису апаратури VHDL.

З огляду на особливості розробки БВС обґрунтовано рекомендації щодо налаштування засобів синтезу (компіляторів) сучасних систем автоматизованого проектування на відповідний режим роботи (на прикладі САПР Quartus II Subscription Edition Software 12.0).

Апробація розроблених методів, моделей та інструментальних засобів виконана на прикладі синтезу багатoversійних систем, які представлені моделями комбінаційних та послідовних автоматів, при реалізації підсистеми управління системою протизаморожувача літака Ан-140. Виконана робота дозволила отримати оптимальні рішення з множини можливих згідно з обраними показниками та сформулювати загальні рекомендації під час розробки БВС на ПЛІС з автоматно-мовною диверсністю.

Таким чином, отримані результати підтверджують ефективність і можливість реалізації запропонованих методів, а також працездатність інструментальних засобів. Визначені у результаті розв'язання задач кількісні показники дозволяють стверджувати, що запропоновані моделі та методи дозволяють підвищити надійність систем критичного застосування на ПЛІС, а також модулів програмно-технічних комплексів для інформаційно-керуючих систем АЕС і знизити ймовірність їх відмов.

ВИСНОВКИ

У дисертації проведено теоретичне обґрунтування й вирішення науково-практичної задачі розробки методів та засобів створення відмовостійких цифрових систем з автоматно-мовною диверсністю на ПЛІС. При цьому було отримано такі наукові та практичні результати.

1. Розроблено метод синтезу багатoversійних цифрових автоматів на ПЛІС з автоматно-мовної диверсністю. Даний метод, на відміну від відомих, базується на спільному використанні різних автоматних моделей і мов опису апаратури, що забезпечує підвищення надійності внаслідок зниження ймовірності відмови за загальною причиною.

2. Удосконалено моделі багатoversійних цифрових автоматів на основі розробки їх канонічних і мікропрограмних структур і варіантів внесення надмірності, що дозволяє розширити множину рішень в процесі синтезу цифрових систем і забезпечити стійкість до фізичних і проектних дефектів;

3. Удосконалено модель життєвого циклу багатoversійних систем на ПЛІС шляхом врахування різних варіантів використання автоматної та мовної диверсності, що дозволяє сформулювати множину алгоритмів синтезу та здійснити їх вибір за критерієм надійності.

4. Дістав подальшого розвитку метод оцінки диверсності багатoversійних систем на ПЛІС за рахунок використання спеціальних процедур засіву та аналізу впливу фізичних й проектних дефектів, що дозволяє розрахувати метрики диверсності і використовувати їх для вибору варіантів реалізації резервних каналів.

5. Практичне значення отриманих результатів полягає в доведенні теоретичних положень дослідження до конкретних інженерних методик, алгоритмів, рекомендацій, інструментальних засобів та їх безпосередньому використанні в області побудови багатoversійних систем на програмованій логіці, а саме:

– розроблені методи та інструментальні засоби аналізу версій проектних рішень, а також надані пропозиції щодо їх удосконалення під час розрахунку показників диверсності, що дозволяє прискорити отримання чисельних результатів;

– розроблена методика синтезу та оцінки надійності багатoversійних цифрових автоматів на ПЛІС з автоматно-мовної диверсності, що дає можливість отримувати оптимальні варіанти версій реалізації під час побудови БВС.

6. Результати досліджень апробовані та впроваджені на підприємствах і закладах, що займаються розробкою, дослідженнями й експлуатацією критичних систем в аерокосмічній галузі, а також при розробці систем аварійного захисту та ін. Використання наукових і прикладних результатів досліджень дозволяє підвищити надійність цифрових систем на програмованій логіці, що використовуються для управління складними об'єктами підвищеної небезпеки. Оцінка рівня підвищення може бути здійснена за показником ймовірності безвідмовної роботи, який залежить від особливості побудови багатoversійної системи та обраної моделі БВЦА. Згідно з отриманими чисельними значеннями ймовірність відмови БВЦА з автоматно-мовною диверсністю по відношенню до класичної схеми дублювання каналів знижено в 1,2 – 2,2 рази (в залежності від відносної кількості абсолютних дефектів проектування).

7. Достовірність наукових положень дисертаційної роботи підтверджена:

– обґрунтованістю прийнятих припущень і вихідних даних при розробці багатoversійних систем на ПЛІС з використанням автоматно-мовної диверсності;

– результатами їх практичного впровадження в програмно-технічні засоби створення багатoversійних проектів на програмованій логіці;

– результатами оцінки надійності та диверсності цифрових систем на ПЛІС для авіаційних комплексів, отриманих при використанні запропонованих моделей, методів і технології розробки.

8. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення методу та процедури оцінки варіантів реалізації версій, тобто розрахунок метрик диверсності, в частині оптимізації часу на отримання результатів обчислень; удосконалення процесу підтримки прийняття рішень під час генерації та вибору варіантів рішень БВС на основі аналізу та створення бази даних типових рішень; проведення подальшого аналізу побудови багатoversійних систем на ПЛІС для різних автоматних моделей, в тому числі мікропрограмних структур та інших мов опису апаратури.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. V. Kulanov. Fault-Tolerant SOPC-based Approaches with Multi-Version IP [Text] / V. Kulanov, V. Kharchenko, J. Prokhorova, S. Ostroumov // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – №8 (27). – С. 71–77.

Здобувачем розроблено частину багатoversійного проекту на мові опису апаратури JHDL для дослідження різноманітних архітектурних рішень відмовостійких проектів на ПЛІС.

2. Куланов, В. О. Метод та уніфіковане середовище перехресного тестування для верифікації багатoversійних цифрових систем управління на ПЛІС [Текст] / В.О. Куланов, В.С. Харченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. – Харків, 2007. – Вип. 57. – Том 2. – С. 203–208.

Здобувачем запропоновано процедуру перехресного тестування під час розробки багатoversійних проектів на ПЛІС та запропоновано структуру уніфікованого середовища для верифікації багатoversійних проектів з використанням JHDL.

3. Куланов, В.О. Об оценке диверсности реализации минимальных форм функций в различных базисах [Текст] / В.А. Куланов // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2008. – № 5. – С. 67–71.

Здобувачем розглянуто залежність чисельних значень показника диверсності від особливостей синтезу комбінаційних автоматів та доведено, що найбільшу ступень диверсності мають такі пари версій комбінаційних автоматів, які представлені в різних базисах.

4. Куланов, В.А. Модель жизненного цикла систем обработки информации на программируемой логике при использовании автоматически-языковой диверсности [Текст] / В.А. Куланов, В.С. Харченко // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2008. – № 4. – С. 98–102.

Здобувачем отримано модель життєвого циклу багатoversійних систем критичного застосування на ПЛІС з використанням принципів автоматно-мовної диверсності.

5. Куланов, В. О. Аналіз та оцінка внутрішньої мовної багатoversійності для систем обробки інформації на програмованій логіці [Текст] / В.О. Куланов, В.С. Харченко // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. – Харків, 2008. – Вип. 73. – Том 2. – С. 73–75.

Здобувачем визначено поняття внутрішньої та зовнішньої мовної багатoversійності, запропоновано принцип розробки та оцінки варіантів реалізації версій критичної системи на ПЛІС з використанням внутрішньої мовної багатoversійності на прикладі мови опису апаратури VHDL.

6. Куланов, В. А. Инструментальное средство засева и моделирования константных неисправностей встроенных систем на ПЛИС [Текст] / В.А. Куланов, С.А. Куланов, А.С. Скрынник // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2010. – № 7 (48). – С. 225–230.

Здобувачем досліджено існуючі методи та засоби моделювання константних несправностей та розроблено інструментальний засіб внесення та моделювання константних несправностей.

7. Kulanov, V. Components Visualization Approach for FPGA-based Projects Verification [Text] / V. Kulanov, V. Kharchenko // *The 5th IEEE East-West Design & Test Symposium – EWDTs'2007: Conference Proceedings*. Yerevan (AR). 2007. – P. 613–617.

Здобувачем запропоновано способи використання компонентів візуалізації під час верифікації проектних рішень на ПЛІС.

8. Kulanov, V. Parameterized IP Infrastructures for Fault-Tolerant FPGA-Based Systems: Development, Assessment, Case-Study [Text] / V. Kulanov, V. Kharchenko, A. Perepelitsyn // *The 7th IEEE East-West Design & Test Symposium – EWDTs'2007: Conference Proceedings*. Moscow (RU). 2009. – P. 322–325.

Здобувачем запропоновано використання механізму параметризації IP-інфраструктур проектних рішень на ПЛІС, проведено оцінку надійності для різних архітектурних рішень ІР.

9. Kulanov, V. Design Fault Injection-Based Technique and Tool for FPGA Projects Verification [Text] / L. Reva, V. Kulanov, V. Kharchenko // The 9th IEEE East-West Design & Test Symposium – EWDTTS'2011: Conference Proceedings. Sevastopol (UA). 2011. – P. 191–195.

Здобувачем досліджено методи та засоби незалежної верифікації та валідації проектних рішень на ПЛІС та запропоновано інструментальний засіб профілювання та внесення VHDL-дефектів.

10. Куланов В.А. Анализ построения цифровых систем с использованием набора инструментальных средств проектирования JHDL [Текст] / В.А. Куланов // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2006: тези доп. Міжнар. Наук.-техн. конф. – Харків, 2006. – С. 297.

Здобувачем обґрунтовано можливість розробки багатoversійних проектів на ПЛІС з використанням пакету інструментальних засобів та мови опису апаратури JHDL.

11. Куланов В.А. Анализ и классификация ошибок на этапах жизненного цикла проектов на ПЛИС [Текст] / В.А. Куланов, А.А. Галькевич // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007: тези доп. Міжнар. Наук.-техн. конф. – Харків, 2007. – С. 353.

Здобувачем досліджено та надано класифікацію помилок на етапах життєвого циклу проектів на ПЛІС.

12. Куланов В.А. Анализ разработки цифровых автоматов на ПЛИС с использованием языков описания аппаратуры VHDL и Verilog [Текст] / В.А. Куланов, Л.В. Рева // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2009: тези доп. Міжнар. Наук.-техн. конф. – Харків, 2009. – С. 211.

Здобувачем досліджено омоделі опису цифрових проектів на ПЛІС з використанням мов опису апаратури VHDL та Verilog, надано порівняльну характеристику та рекомендації щодо опису кінцевих автоматів.

13. Куланов В.А. Анализ разработки систем на ПЛИС с использованием автоматов Мили и Мура на языке VHDL [Текст] / В.А. Куланов, А.А. Галькевич, Р.А. Хайрединов // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2009: тези доп. Міжнар. Наук.-техн. конф. – Харків, 2009. – С. 221.

Здобувачем досліджено особливості розробки проектних рішень на ПЛІС, представлених моделями автоматів Мілі та Мура.

АНОТАЦІЇ

Куланов В.О. Методи та засоби розробки відмовостійких систем на ПЛІС з автоматно-мовною диверсністю. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2012.

У дисертації вирішена актуальна науково-прикладна задача розробки методів та засобів створення відмовостійких цифрових систем на програмованій логіці з автоматно-мовною диверсністю.

Науковими результатами досліджень є: метод синтезу багатoversійних цифрових автоматів на ПЛІС з автоматно-мовною диверсністю; моделі багатoversійних цифрових автоматів; модель життєвого циклу багатoversійних систем на ПЛІС з автоматно-мовною диверсністю; метод оцінки диверсності багатoversійних систем на ПЛІС з автоматно-мовною диверсністю.

Запропоновані моделі, методи та інструментальні засоби розробки дозволяють підвищити надійність багатoversійних систем критичного застосування на ПЛІС, що досягається за рахунок зменшення ймовірності відмови системи через загальні причини завдяки використанню автоматно-мовної диверсності.

Ключові слова: надійна цифрова система, програмована логіка, ПЛІС, багатoversійний цифровий автомат, автоматно-мовна диверсність, життєвий цикл, синтез цифрових автоматів, мови опису апаратури.

Куланов В. А. Методы и средства разработки отказоустойчивых систем на ПЛИС с автоматно-языковой диверсностью. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2012.

В диссертации сформулирована и решена актуальная научно-прикладная задача разработки методов и средств создания отказоустойчивых цифровых систем на программируемой логике с автоматно-языковой диверсностью. Сущность предложенного подхода заключается в разработке моделей многоверсионных цифровых автоматов (МВЦА), а также методов их синтеза и оценки для повышения надежности систем критического применения на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС).

В первом разделе проведен анализ теории и практики создания многоверсионных систем (МВС) на программируемой логике, а также исследована нормативная база требований к критическим системам. Установлено, что существующие модели и методы разработки многоверсионных систем на ПЛИС рассмотрен на достаточно абстрактном уровне. Была сформулирована научная проблема и комплекс задач для ее решения, определена методика исследований.

Во втором разделе, используя методы системного анализа и теории многоверсионных систем, сформулирован принцип диверсификации проектов на ПЛИС в рамках автоматно-языковой диверсности. В рамках данного принципа предложено в процессе разработки многоверсионных систем вносить версию избыточность на уровне множества моделей цифровых автоматов и множества языков описания аппаратуры. В связи с этим в работе усовершенствованы модели многоверсионных цифровых автоматов (МВЦА) на основе детализации их структур и вариантов избыточности для канонических и микропрограммных автоматов, что позволило расширить множество возможных решений для синтеза цифровых систем, устойчивых к физическим и проектным дефектам. Рассмотрены особенности описания цифровых

систем в рамках языковой диверсности с использованием языков описания аппаратуры VHDL и Verilog.

В третьем разделе, с учетом особенностей разработки многоверсионных систем усовершенствована модель жизненного цикла, которая учитывает внесение автоматной и языковой избыточности. Разработан метод синтеза многоверсионных цифровых автоматов различных классов, основанный на этапах синтеза множества одноверсионных моделей цифровых автоматов различных классов с учетом уровней и видов автоматной диверсности, а также их особенностей описания в рамках языковой диверсности. Получил дальнейшее развитие метод оценки надежности и диверсности многоверсионных систем на ПЛИС. Проведен расчет показателя вероятности безотказной работы для предложенных моделей МВЦА, а также предложен метод оценки диверсности вариантов реализации версий.

В четвертом разделе представлены результаты экспериментального исследования на примере синтеза комбинационных и последовательностных автоматов в рамках автоматной-языковой диверсности. Разработаны инструментальные средства поддержки расчета метрики диверсности (оценки версий реализаций) на аппаратном уровне и на уровне языков описания аппаратуры. Даны рекомендации по настройке средств синтеза, входящих в состав систем автоматизированного проектирования в процессе создания многоверсионных систем на ПЛИС.

Разработанные модели и методы позволяют повысить надежность систем на программируемой логике за счет минимизации ее отказов по общей причине. Полученные численные значения показывают уменьшение вероятности отказа в 1,2 – 2,2 раза даже при большом количестве абсолютных дефектов проектирования.

Ключевые слова: надежная цифровая система, программируемая логика, ПЛИС, многоверсионный цифровой автомат, автоматной-языковая диверсность, жизненный цикл, синтез цифровых автоматов, язык описания аппаратуры.

Kulanov V. A. Methods and tools for fault tolerant PLD-based system design with machine-language diversity. – Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical Sciences in speciality 05.13.05 – computer systems and components. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2012.

The dissertation is devoted to development of methods and tools for fault-tolerant digital system design based on programmable logic devices with machine-language diversity.

Scientific results are: method of synthesis of PLD-based multi-version digital machines with machine-language diversity; models of multi-version digital machines; lifecycle model of multi-version PLD-based digital systems with machine-language diversity; evaluation method of multi-version PLD-based systems with machine-language diversity.

The proposed models, methods and tools allow to increase reliability of multi-version PLD-based critical system by reducing the probability of system failure due to some common cause through the use of machine-language diversity.

Key words: fault-tolerant digital system, programmable logic, PLD, multi-version digital automata, automata-language diversity, life cycle, finite-state machine synthesis, hardware description language.

Підписано до друку 13.11.2012 р.
Формат 60x90/16
Папір офсетний. Друк ризо графічний.
Умов. друк. арк. 1,0. Замовлення № 312
Наклад 100 прим. Безкоштовно

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
“Харківський авіаційний інститут”
61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр “ХАІ”
61070, м. Харків, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu