

УДК 004.436.2

В.А. Куланов

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА МНОГОВЕРСИОННЫХ ПРОЕКТОВ НА ПЛИС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКОВОЙ ДИВЕРСНОСТИ

Рассмотрены особенности разработки и оценки многоверсионных систем на ПЛИС с использованием языковой диверсности, что позволяет расширить множество формируемых проектных решений и осуществить их выбор по критерию надежности. Предложена расширенная классификация видов и уровней языковой диверсности. Рассмотрен пример разработки и оценки комбинационного автомата с использованием языковой диверсности.

Ключевые слова: диверсность, многоверсионный проект, программируемая логика, ПЛИС, язык описания аппаратуры, HDL, VHDL, профиль дефектов, "засев" дефектов, моделирование неисправностей

Введение

Появление программируемых логические интегральные схемы (ПЛИС) позволило существенно расширить возможности разработчиков в части построения надежных цифровых систем и комплексов критического применения.

Одним из способов повышения надежности подобного класса систем является использование принципа диверсности [1-4]: элементная база от разных производителей, разные средства проектирования, а также группы разработчиков, разные алгоритмы, способы реализации и верификации проектов и т.д. Например, в работе [5] рассмотрены способы внесения различных видов избыточности на этапах жизненного цикла многоверсионной разработки систем критического применения на ПЛИС, которые используются при построении программно-аппаратных комплексов в области атомной энергетики.

Анализ предметной области показал, что несмотря на существование множества видов диверсности [6], языковая диверсность, как способ внесения избыточности в проекты на ПЛИС не детализирован: отсутствуют как рекомендации по формированию (генерации) версий с наибольшей степенью разнообразия, так и процедуры оценки полученных таким образом вариантов реализаций.

Целью статьи является анализ видов и уровней языковой диверсности, а также описание процедуры разработки и оценки проектных решений на ПЛИС с использованием данного типа диверсности.

1. Виды и уровни языковой диверсности

Под языковой диверсностью будем рассматривать такой вид многоверсионности, который достигается за счет внесения избыточности на уровне множества разнообразных языков описания аппара-

туры и/или ресурсов (языковых конструкция, стилей описания и т.д.) в рамках заданного языка.

В работе [7] языковую диверсность предложено рассматривать на двух уровнях:

- внешняя языковая диверсность;
- внутренняя языковая диверсность.

Внешняя языковая диверсность представлена множеством разных языков описания аппаратуры, используемых при реализации (описании) многоверсионных систем и проектов на ПЛИС (VHDL, Verilog, SystemVerilog, SystemC и т.д.).

Внутренняя языковая диверсность определена на уровне множества ресурсов в рамках заданного (одного) языка описания аппаратуры: алгоритмы реализации, стили описания, языковые конструкции.

Помимо рассмотренных уровней, разделим языковую диверсность на два вида – субъектный и объектный.

Объектная языковая диверсность определяется множеством ресурсов языков описания аппаратуры, т.е. возможностями самого языка.

Субъектная языковая диверсность формируется в рамках множества алгоритмов реализации версий, выбора соответствующих структур данных, а также формата их представления и в большей степени зависит от человеческого фактора.

С учетом предложенных допущений описание многоверсионной системы на ПЛИС в рамках языковой диверсности представим в виде кортежа:

$$\gamma = \langle L, E, S, C \rangle,$$

где $L = \{l_1, l_2, \dots, l_i\}$ – множество разных языков описания аппаратуры, $i = \overline{1, n}$; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_j\}$ – множество алгоритмов реализации версий в рамках заданного l_i языка описания аппаратуры, $e = \overline{1, n}$; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ – множество стилей описания проектов, поддерживаемых l_i языком описания аппаратуры, $k = \overline{1, n}$; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ – множество языковых конструкций l_i языка описания аппаратуры, $m = \overline{1, n}$.

Тогда множество кортежей $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i\}$ определяет полное множество вариантов реализации версий V в рамках языковой диверсности (рис. 1):

$$V = \left\{ v_{l_1 e_1}^{s_1 c_1}, \dots, v_{l_1 e_2}^{s_1 c_2}, \dots, v_{l_2 e_1}^{s_2 c_1}, \dots, v_{l_2 e_2}^{s_2 c_2}, \dots, v_{l_i e_1}^{s_i c_1}, \dots, v_{l_i e_j}^{s_i c_m} \right\},$$

$v_{l_i e_j}^{s_k c_n}$ – версия реализации системы в рамках языковой диверсности.

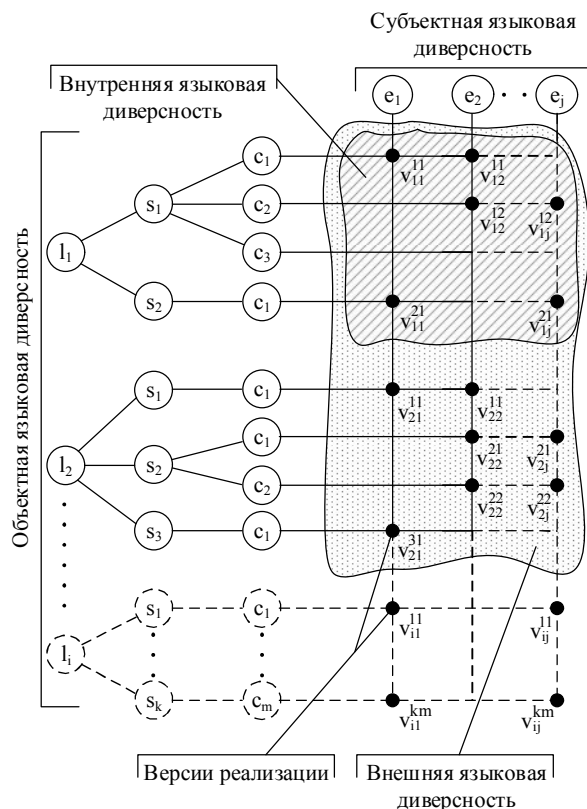


Рис. 1. Уровни и виды языковой диверсности

Таким образом процесс формирования (генерации) версий представим в несколько этапов:

1. Выбор языка (языков) описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog, SystemC и т.д.).
2. Выбор алгоритма (алгоритмов) реализации, а также структур данных (массивы, записи и т.д.).
3. Выбор стиля (стилей) описания проекта (поведенческий, структурный, потоковый и т.д.).
4. Выбор языковых конструкций (условные операторы, операторы выбора, операторы циклов и т.д.).

Отметим, что сложность решаемой задачи непосредственно влияет на количество формируемых проектных решений.

2. Оценка версий проектных решений на ПЛИС с языковой диверсностью

Рассмотрим особенности процедуры оценки полученных решений с использованием принципов языковой диверсности

Результат работы многоверсионной системы может быть следующим:

- все версии демонстрируют одинаково верный результат;
- выходные данные различных версий не совпадают (признак наличия ошибок в одном из каналов);
- все версии выдают одинаково неверный результат.

В последнем случае речь идет о неразличимых дефектах, которые не могут быть выявлены блоком контроля (мажоритарным элементом), что может приводить к отказам системы.

Для оценки степени разнообразия пар вариантов реализации версий воспользуемся предложенной в работе [8] метрикой диверсности D , которая сводится к вероятностной оценке того, что не произойдет отказ системы, т.е. выходной результат для пары версий будет одинаково неверным, при наличии дефектов в двух каналах:

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

где $P(f_i, f_j)$ – вероятность возникновения пары дефектов; $d_{i,j}$ – диверсность по отношению к паре дефектов (f_i, f_j) , т.е. вероятность того, что при наличии пары дефектов в двух версиях (каналах) система не будет формировать одинаково неверный результат (неразличимый тип дефекта).

В качестве типов дефектов выступают HDL-дефекты, вносимые на уровне языков описания аппаратуры.

Процедуру расчета метрики диверсности определим в несколько этапов:

1. Сформируем общий профиль HDL-дефектов F , который включает полное множество типов дефектов проектирования (генеральный профиль) f_i , $F = \{f_1, f_2, \dots, f_i\}$, $i = \overline{1, n}$.

2. На основании статического анализа исходного кода соответствующих HDL-описаний полученных версий $v_k (v_k \in V)$, где k – количество версий, $k = \overline{1, m}$, сформируем проектный профиль дефектов, т.е. найдем подмножество типов дефектов F' , где $F' \subseteq F, \forall f_i \in F': f_i \in F$.

3. С использованием процедуры "засева" дефектов, а также на основании полученного проектного профиля F' для каждой версии HDL-описания v_k , сгенерируем полное множество V' "дефектных" вариантов $v'_{k_j} (v'_{k_j} \in V')$, где j – количество возможных дефектов в рамках заданных типов f_i .

4. Проведем моделирование сформированного множества вариантов "дефектных" пар $\Omega = \langle v'_{k_j}, v'_{k+l_j} \rangle$, соответствующих версий HDL-описаний v_k .

5. На основании полученных данных проведем расчет метрики диверсности D.

Рассмотрим пример разработки указателя старшей единицы в 4-х разрядном двоичном слове с использованием языковой диверсности, а также проведем оценку полученных решений.

Исходные данные:

– Язык описания аппаратуры VHDL (стандарт IEEE Std 1076-2002).

– Программное средство профилирования и "засева" дефектов HDL Fault Injection Tool [9]. Позволяет автоматизировать процесс внесения дефектов и генерации "дефектных" версий.

– Средство моделирования проектных решений – ModelSim-Altera Edition Software.

В общем виде количество полученных версий и варианты их реализации с использованием принципа языковой диверсности представлены на рис. 2.

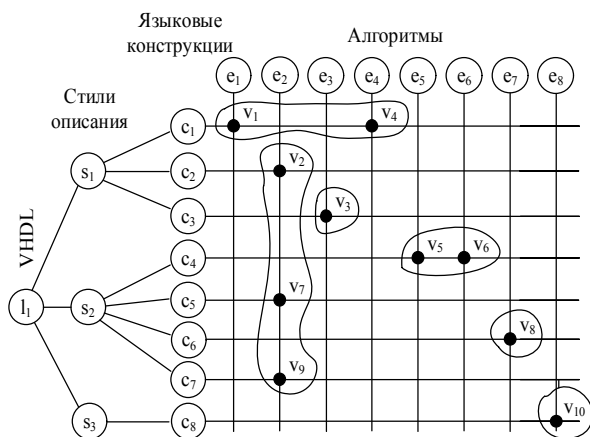


Рис. 2. Варианты реализации указателя старшей единицы в 4-х разрядном двоичном слове в рамках языковой диверсности

Для версий, полученных в рамках одного алгоритма (v₂, v₇, v₉), стиля описания и идентичных языковых конструкций (т.е. v₁, v₄ и v₅, v₆) ограничимся выбором по одному варианту из соответствующих множеств (рис. 2). Таким образом, дальнейшим предметом анализа являются версии: v₁, v₃, v₅, v₈, v₁₀. Тогда общее количество вариантов пар версий составляет $C_n^k = C_5^2 = 10$.

На основании принятых допущений и предложенному в работе [9] генеральному профилю дефектов сформируем полное множество пар HDL-дефектов (табл. 1) для каждого из рассматриваемых вариантов (рис. 3), а также для пары версий (рис. 4).

На основании полученных исходных данных рассчитаем метрику диверсности D для каждой пары версий проекта.

Полученные результаты представлены на рис. 5.

Таблица 1
Количество HDL-дефектов и соответствующих пар дефектов для рассматриваемых версий

№ п/п.	Версии	V ₁	V ₃	V ₅	V ₈	V ₁₀
Версии	Дефекты	5	95	90	70	96
V ₁		-	475	450	350	480
V ₃		475	-	8550	6650	9120
V ₅		450	8550	-	6300	8640
V ₈		450	6650	6300	-	6720
V ₁₀		480	9120	8640	6720	-

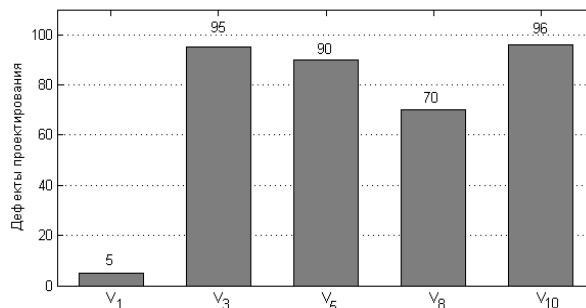


Рис. 3. Количество HDL-дефектов для версий проекта

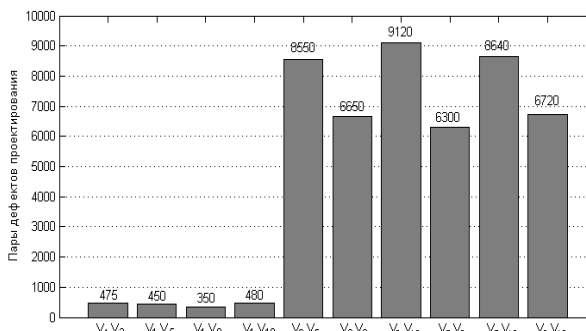


Рис. 4. Количество HDL-дефектов для соответствующих пар версий проекта

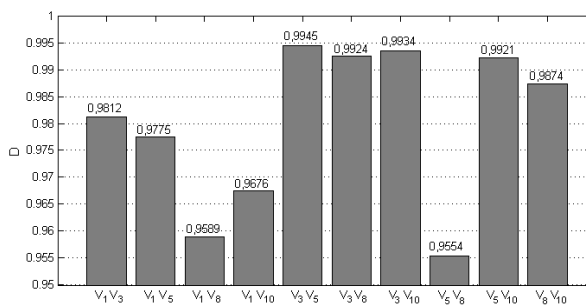


Рис. 5. Значение метрики диверсности D, для различных вариантов пар версий реализации проекта

Таким образом, в рамках языковой диверсности из множества рассматриваемых пар версий реализации проекта (указатель старшей единицы в 4-х разрядном двоичном слове) пара v₃v₅ является более диверсной по отношению к остальным вариантам. Т.е. значение вероятности того, что не произойдет отказ двухверсионной системы, состоящей из версий v₃ и v₅ (при наличии в них дефектов) выше по сравнению с остальными вариантами и равно 0,9945.

Выводы

В работе рассмотрены особенности разработки многоверсионных проектов на ПЛИС с использованием языковой диверсности, что позволяет расширить существующие способы внесения избыточности.

Расширена классификация языковой диверсности по видам и уровням. Установлено, что мощность множества генерируемых решений зависит от сложности решаемой задачи, а также ресурсов языка описания аппаратуры (субъектная языковая диверсность).

Предложена процедура оценки проектных решений, которая позволяет на основе полученных численных значений выбрать пару версий по критерию надежности. Отметим, что сложность проекта влияет на время расчета метрики диверсности. Генерация "дефектных" версий, формирование множества пар и их моделирование все это требует значительной вычислительной мощности и времени.

В дальнейших исследованиях необходимо усовершенствовать процедуру оценки версий проектных решений в том числе в части оптимизации расчета метрики диверсности. Возможным решением в данном направлении является накопление статистики по полученным вариантам и особенностям их реализации, что позволит сформировать ограниченный набор пар и провести их оценку без существенных временных затрат на компьютерные расчеты (моделирование).

Список литературы

1. Avizienis, A. *Fault Tolerance by Design Diversity: Concepts and Experiments* / A. Avizienis, J. P. J. Kelly // *IEEE Computer*. 1984. pp. 67–80.
2. Littlewood, B. *The Impact of Diversity upon Common Mode Failures* / B. Littlewood // *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 51. No. 1. 1996. –P. 101–113.

3. Wood, R. *Diversity Approaches for Common Cause Failure Mitigation* / R. T. Wood // *IAEA Technical Meeting on Integrating Analog and Digital I&C Systems in Hybrid Main Control Rooms at Nuclear Power Plants*. Toronto. Canada. 2007.

4. Многоверсионные системы, технологии и проекты / В.С. Харченко, В.Я. Жихарев, В.М. Илюшко, Н.В. Нечипорук // Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.С. Харченко. –Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 486 с.

5. Головир, В. *Модели, метод и информационная технология разработки многоверсионных информационно-управляющих систем на базе автоматов с программируемой логикой: дис... канд. техн. наук: 05.13.06 / Головир Виктор Александрович ; Национальный аэрокосмический ун-т им. М.Е.Жуковского «Харьковский авиационный ин-т»*. –Х., 2007. – 223 с.

6. *Diversity Strategies for NPP I&C Systems* / R. Wood, R. Belles, M. Cetiner & et al. // *NUREG/CR-7007 ORNL/TM-2009/302*. 2009.

7. Куланов, В. О. *Аналіз та оцінка внутрішньої мовної багатOVERСІЙНОСТІ для систем обробки інформації на програмованій логіці* / В.О. Куланов, В.С. Харченко // *Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. – Вип. 73. – Том 2. – Харків, 2008. – С. 73–75.

8. Mitra, S. *A Design Diversity Metric and Reliability Analysis for Redundant Systems* / S. Mitra, N.R. Saxena, J. McCluskey // *International Test Conference: Conference Proceedings, Atlantic City, NJ*. – 1999. – P. 662–671.

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

Поступила в редакцію 30.01.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальний аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

РОЗРОБКА ТА ОЦІНКА БАГАТОВЕРСІЙНИХ ПРОЕКТІВ НА ПЛІС З ВИКОРИСТАННЯМ МОВНОЇ ДИВЕРСНОСТІ

В.О. Куланов

Розглянуто особливості розробки та оцінки багатOVERСІЙНИХ систем на ПЛІС з використанням мовної диверсності, що дозволяє розширити множину проектних рішень та здійснити їх вибір за критерієм надійності. Запропонована розширена класифікація видів та рівнів мовної диверсності. Розглянуто приклад розробки та оцінки комбінаційного автомату з використанням мовної диверсності.

Ключові слова: диверсність, багатOVERСІЙНИЙ проект, прогамована логіка, ПЛІС, мова опису апаратури, HDL, VHDL, профіль дефектів, "засів" дефектів, моделювання несправностей

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF MULTI-VERSION FPGA-BASED PROJECTS WITH LANGUAGE DIVERSITY

V.A. Kulanov

The development and evaluation process of multi-version FPGA-based systems with language diversity is considered. It allows to increase a number of implementations of the project and to make a choice based on the reliability criteria. The classification of types and levels of language diversity is expanded. An example of combinational unit design and evaluation with language diversity approach is considered.

Keywords: diversity, multi-version project, programmable logic, PLD, hardware description language, HDL, VHDL, faults profile, fault injection, fault modeling