

УДК 004.052

Дрозд Ю. В., канд. техн. наук,

Дрозд А. В., д-р техн. наук,

Аль-Дабн М. М.

ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МНОГОПОТОЧНОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. Рассмотрены особенности развития рабочего диагностирования с позиции ресурсного подхода. Показана целесообразность развития объектов диагностирования – современных конвейерных систем – в направлении многопоточной поразрядной обработки данных. Анализируются цель, модели и методы рабочего диагностирования цифровых устройств. На основе этого анализа предлагается метод рабочего диагностирования со сканирующим контролем по неравенствам для многопоточной системы поразрядных конвейеров.

Ключевые слова: рабочее диагностирование, конвейерные системы, ресурсный подход, многопоточная система, поразрядные конвейеры, метод сканирующего контроля по неравенствам.

Дрозд Ю. В., канд. техн. наук,

Дрозд О. В., д-р техн. наук,

Аль-Дабн М. М.

ОСОБЛИВОСТІ РОБОЧОГО ДІАГНОСТУВАННЯ БАГАТОПОТОКОВОЇ КОНВЕЄРНОЇ СИСТЕМИ

Анотація. Розглянуто особливості розвитку робочого діагностування з позиції ресурсного підходу. Показано доцільність розвитку об'єктів діагностування – сучасних конвеєрних систем – у напрямку багатопотокової порозрядної обробки даних. Аналізується мета, моделі та методи робочого діагностування цифрових пристроїв. На основі цього аналізу пропонується метод робочого діагностування зі скануючим контролем за нерівностями для багатопотокової системи порозрядних конвеєрів.

Ключові слова: робоче діагностування, конвеєрні системи, ресурсний підхід, багатопотокова система, порозрядні конвеєри, метод скануючого контролю за нерівностями.

Drozd J. V., PhD.,

Drozd A. V., ScD.,

Al-Dhabi M. M.

PARTICULARITIES OF ON-LINE TESTING OF A MULTITHREADING PIPELINE SYSTEM

Abstract. Particularities of on-line testing development from a line item of resource-based approach are considered. Feasibility of development of the testing objects – the modern pipeline systems – in the direction of multithreaded digit-by-digit data processing is shown. The purpose, models and methods of on-line testing of the digital devices are analysed. On the basis of this analysis the on-line testing method with scan checking by inequalities for multithreaded system of digit-by-digit pipelines is offered.

Key words: on-line testing, arc of steel-melting furnaces, pipeline systems, resource-based approach, multithreaded system, digit-by-digit pipelines, scan checking method by inequalities.

Введение. В развитии рабочего диагностирования цифровых вычислительных устройств можно выделить три основных этапа [1]. Первый этап, начальный, характеризуется заимствованием моделей, методов и средств из теории и практики помехоустойчивого кодирования для передачи данных на расстояние. Вторым этапом, становления, проявился в распространении рабочего диагностирования на собственные средства путем развития теории и практики построения полностью самопроверяемых схем в рамках модели точных данных [2, 3]. Основное содержание третьего, текущего этапа состоит в распространении рабочего диагностирования

на приближенные вычисления, что происходит в соответствии с основными положениями ресурсного подхода, рассматривающего развитие искусственного мира, создаваемого человеком, с позиции его интеграции в естественный мир (ЕМ) [4]. Ресурсный подход объединяет модели, методы и средства в ресурсы, необходимые для решения задач, проблем, т.е. вызовов ЕМ как реакции на неадекватные решения человека, усложняющие интеграционный процесс. Задача решается при достижении определенной производительности и достоверности в процессе и результате решения. Производительность характеризует отдачу, получаемую от ресурсов, а достовер-

ность – степень гармонизации с ЕМ.

Ресурсы развиваются от простого к реальному, структурируясь под особенности ЕМ, среди которых в компьютерном мире оказались наиболее проявленными параллелизм и приближенность (fuzziness). Простыми формами ресурсов являются точные и последовательные в соответствии с исходными представлениями и возможностями человека. Реальные ресурсы отражают ЕМ – параллельный и приближенный.

Третий этап в совершенствовании РД связан с развитием модели чисел от точных к приближенным, что отражается на объекте РД и на всех основных положениях РД, требуя обновления его методов и средств.

Задачи исследования: опираясь на ресурсный подход, оценить развитие цели и объекта РД, а также предложить метод РД, учитывающий перспективу такого развития.

Решение проблемы. Ресурсный подход в развитии ресурсов выделяет три уровня: репликацию (штамповка клонов, однородных операционных элементов), диверсификацию (развитие клонов и однородных элементов в особи и версии) и автономизацию, относя матричный и конвейерный виды параллелизма, используемые в компьютерных системах, соответственно к первым двум уровням [4].

Современные компьютерные системы и их компоненты строятся конвейерными, однако в качестве участков конвейера используются одноканальные узлы с матричным параллелизмом. Они выполняют вычисления, получая и выдавая числовые данные в параллельных кодах, но эти коды обрабатываются последовательно от младших разрядов к старшим. Структура самой быстрой схемы матричного N -разрядного умножителя содержит $2N - 2$ последовательно соединенных операционных элементов [5], т.е. каждый из почти N^2 операционных элементов используется в такте на малую $(2n - 2)$ -ю часть времени. В случае $N = 32$, время работы каждого из 10^3 операционных элементов составляет только 1,6%. Кроме того, схемы матричных узлов отличаются большой сложностью и значительными потерями энергии на паразитные переключения, связанные с состязаниями сигналов [6].

Эти проблемы решаются при поразрядной конвейеризации вычислений, уменьша-

ющей долю матричного параллелизма на участках конвейера до одного операционного элемента.

Поразрядный конвейер повышает уровень параллелизма: все разряды обрабатываются одновременно на разных участках конвейера. Сложность устройства снижается с квадратичной зависимости от разрядности операндов до линейной. Устраняются потери энергии на критические состязания. Многократное уменьшение количества входов и выходов арифметических узлов повышает степень их самодостаточности (независимости от внешних узлов) на пути к верхнему уровню развития ресурсов – автономии [4].

Для обеспечения высокой производительности поразрядные конвейеры реплицируются, образуя многопоточную систему.

Обеспечение высокой достоверности результатов вычислений требует соответствующего развития методов РД.

Модели и методы РД. Третий этап в развитии РД стал возможным, благодаря значительному увеличению объемов обработки приближенных данных, поддержанных аппаратно в форматах с плавающей точкой [7]. На этой основе получила распространение модель приближенных данных, в которой разряды результата разбиваются на старшие верные и младшие неверные [8]. Неисправности цифровой схемы вызывают в них ошибки, которые для достоверности результата являются соответственно существенными и несущественными [9].

Приближенная обработка данных скорректировала цель РД, показав несостоятельность поиска неисправностей в процессе вычислений и необходимость оценки достоверности результата. Оценка средств решения задачи и оценка достоверности результата – эти две цели совпадают в рамках модели точных данных, где все ошибки являются существенными, а потому недостоверный результат свидетельствует о неисправности.

В рамках новой модели достоверность методов РД определяется по формуле [10]:

$$D = P_C P_O + (1 - P_C) (1 - P_O), \quad (1)$$

где P_C – вероятность существенной ошибки;

P_O – вероятность обнаружения ошибки.

Методы РД впервые демонстрируют приближенный характер, ошибаясь при обна-

ружении несущественной ошибки вследствие размытой границы между верными и неверными разрядами результата.

Достоверность традиционных методов РД, разработанных при построении полностью самопроверяемых схем в рамках модели точных данных, оказалась близкой к нулю, поскольку их высокая вероятность P_O используется в основном для отбраковки ошибочных, но достоверных результатов, вычисляемых при наиболее распространенных несущественных ошибках.

Из формулы (1) следуют два пути повышения достоверности методов РД, когда оба параметра P_C и P_O находятся по одну сторону от 0,5. Обнаружение существенных и несущественных ошибок с разной вероятностью открывает третий наиболее эффективный путь, позволяющий оценивать величину ошибки. По этому пути разработаны методы сканирующего контроля и контроля по неравенствам для схем матричных узлов [10]. Эти методы ориентированы соответственно на регулярную структуру и учет особенностей выполняемых операций, что может быть эффективно использовано в многопоточной системе поразрядных конвейеров.

Метод сканирующего контроля по неравенствам для многопоточной системы. Сканирующий контроль выполняется поочередным подключением блока контроля к поразрядным конвейерам по их двум входам и выходу, т.е. в трех точках.

Контроль по неравенствам определяет верхнюю и нижнюю границы результата по операндам и сравнивает результат с границами, формируя код контроля. Для операции умножения двух операндов A и B (прямых кодов без знака нормализованных мантисс) неравенства, связывающие результат с его границами, имеют следующий вид [10]: $A \cdot B < \min(A, B)$ и $A \cdot B > A + B - 1$. Неравенство для верхней границы может проверяться по совпадению двух условий: $A \cdot B < A$ и $A \cdot B < B$. Формирование границ и их сравнение с результатом выполняется одновременно с вычислением результата в последовательном коде. Код контроля определяется по завершению операции умножения.

Покажем, что предложенный метод различает существенные и несущественные

ошибки. Рассмотрим неравенство для верхней границы, выделив случай, например, $A < B$.

Пусть $B - A = C$, где $0 \leq C < 2^{-1}$ и положительная ошибка, увеличивающая результат, происходит в разряде I результата. Разряды мантисс пронумерованы, начиная с первого, старшего. Тогда неравенство при необнаруженной ошибке 2^{-I} принимает вид: $A \cdot (A + C) + 2^{-I} < A$ или $A^2 - (1 - C)A + 2^{-I} < 0$, $(A - X_1)(A - X_2) < 0$, где $X_{1,2} = (1 - C \pm D) / 2$, $D = \sqrt{((1 - C)^2 - 2^{2-I})}$, $(1 - C)^2 \geq 2^{2-I}$, $I \geq 2$ для $C = 0$ и $I \geq 4$ для $C = 2^{-1}$.

Вероятность пропуска ошибки определяется отношением длины отрезка $G = X_2 - \max(X_1, 2^{-2})$, $0 \leq G < 0,75$, где ошибка не обнаруживается, к области определения $2^{-2} \leq A \cdot B < 1$, в общем случае ненормализованного произведения: $P_{\text{ПП}} = 4D / 3$. Вероятность обнаружения положительной ошибки определяется как $P_{\text{ОП}} = 1 - P_{\text{ПП}}$.

На рис.1 показаны диаграммы вероятности $P_{\text{ОП}}$ (в процентах) в зависимости от номера ошибочного разряда I для случаев $C = 0$, $C = 2^{-3}$, $C = 2^{-2}$, и $C = 2^{-1}$.

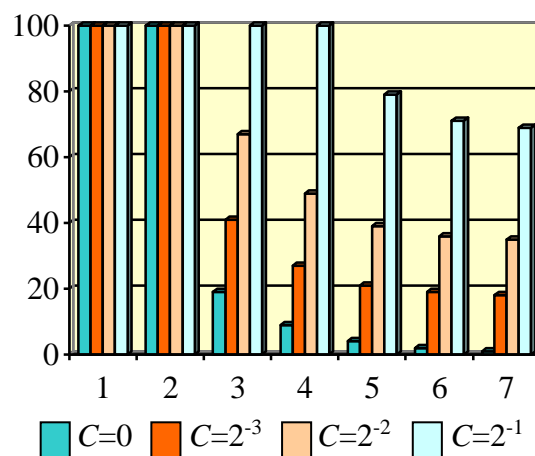


Рис. 1. Вероятность обнаружения положительной ошибки

Неравенство для нижней границы при необнаруженной отрицательной ошибке 2^{-I} принимает вид: $A^2 - (2 - C)A + 1 - C + 2^{-I} < 0$, или $(A - X_1)(A - X_2) < 0$, где $X_{1,2} = (2 - C \pm D) / 2$, $D = \sqrt{(C^2 + 2^{2-I})}$.

Вероятность пропуска отрицательной ошибки определяется отношением длины отрезка $X_1 - 2^{-2}$, $X_1 \geq 2^{-2}$, где ошибка не обнаруживается, к области определения произведения: $P_{\text{ПО}} = 4(X_1 - 2^{-2}) / 3$. Вероятность обнаружения отрицательной ошибки определя-

ется как $P_{00} = 1 - P_{10}$.

На рис. 2 показаны диаграммы вероятности P_{00} (в процентах) в зависимости от номера ошибочного разряда I для случаев $C = 0$, $C = 2^{-3}$, $C = 2^{-2}$, и $C = 2^{-1}$.

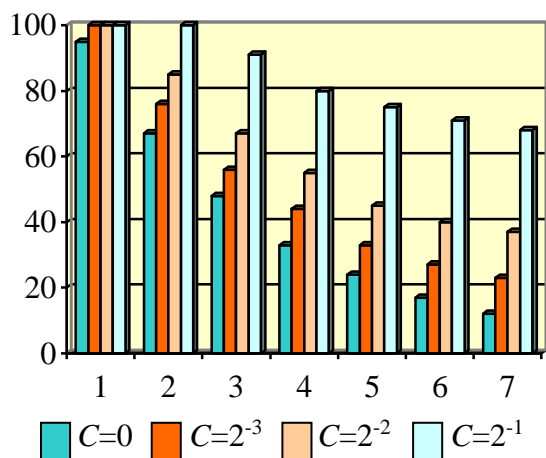


Рис. 1. Вероятность обнаружения отрицательной ошибки

Таким образом, метод демонстрирует различие существенных и несущественных ошибок по вероятности их обнаружения: с повышением веса ошибочного разряда ошибка становится существенной и обнаруживается с большей вероятностью.

Выводы. Согласно ресурсному подходу следует ожидать развитие конвейерных систем как объектов РД в направлении многопоточной обработки данных на множествах поразрядных конвейеров.

С развитием модели приближенных данных, достоверность методов РД проявляется в контроле достоверности результатов, стимулируя не повышение вероятности обнаружения неисправности схемы или ошибки результата, а различия существенных и несущественных ошибок.

Наибольшую эффективность демонстрируют методы РД, которые выделяют существенные ошибки на фоне несущественных, оценивая величину ошибки по вероятности их обнаружения. К таким методам РД матричных устройств относятся сканирующий контроль и контроль по неравенствам.

Предложенный метод РД, показанный для многопоточной системы поразрядных конвейерных умножителей, использует сканирующий контроль для поочередной проверки конвейеров и контроль по неравен-

ствам для обнаружения существенных ошибок в старших разрядах результатов с большей вероятностью, чем несущественных ошибок в младших разрядах.

Список использованной литературы

1. Drozd J. A resource approach to on-line testing of computing circuits / J. Drozd, A. Drozd, M. Al-dhabi // Proc. IEEE East-West Design & Test Symposium. – Batumi, Georgia, Sept. 2015. – P. 276-281.
2. Anderson D.A. Design of totally self-checking check circuits for m-out-of-n codes / D.A. Anderson, G. Metze // IEEE Trans. Comput., Vol. C – 22, No 3. – 1977. – P. 263 – 269.
3. Metra C. Self-checking scheme for the on-line testing of power supply noise / C. Metra, L. Schiano, M. Favalli and B. Ricco // Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference. – Paris, France. – March 2002. – P. 832-836.
4. Drozd J., Models, Methods and Means as Resources for Solving Challenges in Co-Design and Testing of Computer Systems and their Components / J. Drozd, A. Drozd // Proceedings of the 9th International Conference on Digital Technologies. – Zhilina, Slovak Republic. – May 2013. – P. 225-230.
5. Tanenbaum A., Structured Computer Organization, 4th ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999. – 698 p.
6. Chandracasan, A.P., Sheng, R., Brodersen, S. Low-Power CMOS Digital Design / A.P. Chandracasan, R. Sheng, S. Brodersen // IEEE Journal of solid-state circuits. – Vol. 27, No 4, 1992. – pp. 473-484.
7. Goldberg D., What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic / D.Goldberg // ACM Computer Surveys. – Vol. 23, No 1, 1991. – P. 5-18.
8. Демидович Б.П. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. – М.: Физматгиз, 1966. – 664 с.
9. Drozd A. The problem of on-line testing methods in approximate data processing / A. Drozd, M. Lobachev, J. Drozd // Proceedings of the 12th IEEE International On-Line Testing Symposium. – Como, Italy. – July 2006. – P. 251-256.
10. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А.В. Дрозд, В.С. Харченко, С.Г. Антошук,

Ю.В. Дрозд, М.А. Дрозд, Ю.Ю. Сулима / Под ред. Дрозда А.В., Харченко В.С. – Х.: Нац. аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2012. – 614 с.

Получено 08.05.2016

References

1. Drozd J., Drozd A., Al-Dhabi M. A resource approach to on-line testing of computing circuits, (2015), *Proceedings of the IEEE East-West Design & Test Symposium*, Batumi, Georgia, Sept. 2015, pp. 276 – 281. (In English).

2. Anderson D. A., Metze G. Design of totally self-checking check circuits for m-out-of-n codes, (1977), *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C – 22, No 3, pp. 263 – 269. (In English).

3. Metra C., Schiano L., Favalli M and Ricco B. Self-checking scheme for the on-line testing of power supply noise, (2002) *Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference*, Paris, France, March 2002, pp. 832-836. (In English).

4. Drozd J., Drozd A. Models, Methods and Means as Resources for Solving Challenges in Co-Design and Testing of Computer Systems and their Components, (2013), *Proceedings of the Ninth International Conference on Digital Technologies*, Zhilina, Slovak Republic, 29 – 31 May 2013, pp. 225-230. (In English).

5. Tanenbaum A., *Structured Computer Organization*, 4th ed., (1999), *Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall*, 698 p. (In English).

6. Chandracasan, A.P., Sheng, R., Brodersen, S. Low-Power CMOS Digital Design, (1992), *IEEE Journal of solid-state circuits.*, Vol. 27, No 4, pp. 473-484.

7. Goldberg D., (1991), What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic, *ACM Computer Surveys*, Vol. 23, No 1, pp. 5-18. (In English).

8. Demidovich B. P., Maron I. A. *Osnovnykh vichislitel'noy matematiki* [Foundations of computing mathematics], (1966), *M.: Fizmatgiz*, 664 p. (In Russian).

9. Drozd A., Lobachev M., Drozd J. The problem of on-line testing methods in approximate data processing, (2006), *Proceedings of the 12th IEEE International On-Line Testing*

Symposium, Como, Italy, July 2006, pp. 251-256. (In English).

10. Drozd, A.V., Kharchenko, V. S. *Rabochee diagnostirovanie bezopasnykh informacionno-upravljajushhih sistem* [On line testing of the safe instrumentation and control systems] Russ. ed.: A. V. Drozd, V. S. Kharchenko, (2012), Kharkiv, MON, NAU “KhAI” Publ., 614 p. (In Russian).



Дрозд Юлия Владимировна, к.т.н., доц., доц. каф. информационных систем Одесского национального политехнического ун-та, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, тел.: (048)705-8566. E-mail: dea_lucis@ukr.net



Дрозд Александр Валентинович, д.т.н., проф., проф. каф. компьютерных интеллектуальных систем и сетей Одесского национального политехнического ун-та, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, тел.: (048)705-8330. E-mail: drozd@ukr.net



Аль-Даби Мохаммед Мохаммед, аспирант каф. компьютерных интеллектуальных систем и сетей Одесского национального политехнического ун-та, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, тел.: (048)705-8330. E-mail: aldhabi@mail.ru