

## МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОРАЗРЯДНОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ СИСТЕМЫ

М. М. Аль-Даби, А. В. Дрозд, М. А. Дрозд

Одесский национальный политехнический университет

**Аннотация.** Обосновывается необходимость развития ресурсов – моделей, методов и средств – для рабочего диагностирования поразрядной конвейерной системы. Рассматриваются особенности рабочего диагностирования поразрядных конвейеров. На основе ресурсного подхода предлагаются и развиваются модели, определяющие дальнейшее совершенствование методов и средств рабочего диагностирования, включая модели данных и результата, модели операции и доступа к данным.

**Ключевые слова:** ресурсный подход, рабочее диагностирование, поразрядная конвейерная система, модели данных и результата, модели операции и доступа к данным.

### Введение

Рабочее диагностирование существенным образом зависит от объекта диагностирования и отслеживает его развитие, основное содержание которого внешне воспринимается как история повышения производительности путем распараллеливания вычислительных процессов [1].

Ресурсный подход, анализирующий вписывание искусственного мира, создаваемого человеком, в естественный, показывает первичность параллелизма и размытости естественного мира, определяя вектор развития ресурсов – моделей, методов и средств – от простого к реальному. Простые формы ресурсов определяются изначальными точными и последовательными представлениями и возможностями человека в развитии ресурсов, а реальные формы отражают особенности естественного мира, среди которых в компьютерном мире наибольшее проявление получили параллелизм и приближенность [2].

Повышение производительности связывается ресурсным подходом с нижним уровнем развития ресурсов – репликацией, когда ресурсные ниши – экологические, технологические, рыночные и т. п. – не заполнены, и штамповка клонов в природе и однородных элементов в компьютерном мире с нарастающей производительностью является наилучшим условием интеграции в естественный мир. На среднем уровне развития ресурсов – диверсификации, когда ресурсные ниши закрываются, выживание происходит за счет развития особенностей, превращающих клоны в особи, а однородные элементы – в версии. Производительность уступает место достоверности. На верхнем уровне развития ресурсов – автономизации – ключевую позицию занимает самодостаточность [3].

© Аль-Даби М. М., Дрозд А. В., Дрозд М. А.,  
2017

Матричный и конвейерный параллелизм схемотехнических решений занимают соответственно уровни репликации и диверсификации. Современные компьютерные системы и их компоненты строятся конвейерными, но секциями конвейеров служат одноклеточные матричные узлы, обеспечивая доминирование матричного параллелизма над конвейерным [4]. Принадлежность матричного параллелизма нижнему уровню развития ресурсов определяет низкие показатели компьютерных систем, убедительно демонстрируемые на примере выполнения ключевой операции приближенных вычислений – умножения, присутствующего в самом представлении приближенных данных в форматах с плавающей точкой [5]. По этой причине операции над мантиссами в том или ином виде выполняют умножение, а результаты этих операций наследуют свойства произведения.

Матричный множитель  $n$ -разрядных двоичных кодов содержит  $n^2$  операционных элементов и выполняет операцию за один такт, продолжительность которого определяется последовательным соединением  $2n - 2$  операционных элементов, т. е. каждый из них работает только  $1/(2n - 2)$ -ю часть времени, что для 64-битовой платформы составляет менее одного процента. Это не только снижает показатель отношения производительности к сложности, но и более важный показатель отношения производительности к энергопотреблению, характеризующий низкий уровень самодостаточности в энергообеспечении. Действительно, матричные структуры своими размерами обуславливают значительную статическую составляющую энергопотребления, с одной стороны, и создают условия для паразитных переключений сигналов вследствие различной длины путей их распространения.

ния, с другой стороны. Количество паразитных переключений сигналов в матричном умножителе многократно превышает количество функциональных переключений, что соответственно увеличивает динамическую составляющую энергопотребления.

Матричные структуры существенно ограничивают возможности получения достоверных результатов и оценки достоверности методами рабочего диагностирования для наиболее ответственной области применения IT-технологий – обеспечения функциональной безопасности объектов повышенного риска: энергоблоков электростанций и энергосетей, воздушного и скоростного наземного транспорта, космической и военной техники. Безопасность обеспечивается информационно управляющими системами критического применения, которые проектируются для работы в двух режимах: нормальном и аварийном [6, 7]. Матричные структуры цифровых компонентов таких систем порождают проблему скрытых неисправностей. Проблема состоит в накоплении на протяжении продолжительного нормального режима скрытых неисправностей, которые в аварийном режиме снижают отказоустойчивость системы, на которой основывается ее функциональная безопасность [8].

Одним из подходов к решению описанных проблем является сокращение матричных структур в секциях конвейера вплоть до одного операционного элемента. Однако такое существенное изменение объекта диагностирования требует соответствующего развития моделей рабочего диагностирования, которое рассматривается в следующих разделах статьи.

### 1. Модель данных

Базовой для рабочего диагностирования является модель данных, которая прошла путь от однокомпонентной точной формы к приближенному представлению данных в форматах с плавающей точкой с использованием двух компонентов: мантиссы и экспоненты.

Модель приближенных данных выделяет в структуре числа старшие верные и младшие неверные разряды, в которых неисправности схем вызывают соответственно существенные и несущественные для достоверности числа ошибки. Получает развитие цель рабочего диагностирования. Для точных данных, т. е. целых по своей природе, где все разряды – верные, а ошибки – существенные, цель определяется как оценка исправности средств получения результатов обнаружением неисправностей. В действительности, рабочее диагностирование нацелено на оценку

достоверности результатов. В случае точных данных обе цели совпадают. Традиционные методы рабочего диагностирования, разработанные для точных данных теории построения полностью самопроверяемых схем, направлены на обнаружение любой неисправности из заданного множества по первой ошибке. В рамках модели приближенных данных эти методы демонстрируют достоверность, близкую к нулю, используя высокую обнаруживающую способность на выявление наиболее частых несущественных ошибок, при которых результат является достоверным [9].

Для повышения достоверности методов рабочего диагностирования были предложены два пути для объектов диагностирования с соответственно высокой и низкой вероятностью существенной ошибки, а также третий путь, позволяющий оценивать величину результата и ошибки. Методы контроля по неравенствам, использующие третий путь, сравнивают результат с его нижней и верхней границами, вычисленными по операндам [10].

### 2. Модели результата

Для совершенствования методов контроля по неравенствам необходимо развивать модели результата, служащие ему верхней и нижней границами. В случае операций над мантиссами основой для моделей результата могут служить ограничения, накладываемые на мантиссу нормализованного числа.

В современных форматах данных с плавающей точкой мантисса  $S$  нормализованного числа находится в пределах:  $1 \leq S \leq 2$  [11].

Для мантисс  $S_1$  и  $S_2$  двух сомножителей в операции умножения мантисса результата  $V = S_1 S_2$  может быть представлена нижней границей

$$V_H = \max(S_1, S_2),$$

принимая во внимание, что произведение  $V$  не меньше каждой из мантисс  $S_1$  и  $S_2$ , поскольку они умножаются соответственно на мантиссу  $S_2 \geq 1$  и  $S_1 \geq 1$ .

Верхняя граница

$$V_B = 2 \min(S_1, S_2)$$

определяется с учетом того, что половина произведения  $V$  не больше каждой из мантисс  $S_1$  и  $S_2$ , поскольку в этом случае они умножаются со-

ответственно на половину мантииссы  $S_2/2 < 1$  и  $S_1/2 < 1$ .

В операции деления мантииссы  $S_1$  на мантииссу  $S_2$  нижняя граница  $Q_n$  частного  $Q = S_1/S_2$ ,  $0,5 < Q < 2$  может быть получена, с использованием неравенства  $(S_2 - 1)(Q - 2) \leq 0$ .

После раскрытия скобок оно приводится к виду  $S_1 - 2S_2 + 2 \leq Q$ , определяющему границу по формуле

$$Q_H = S_1 - 2S_2 + 2.$$

Верхняя граница

$$Q_B = S_1/2 - S_2 + 2$$

следует из неравенства  $(S_2 - 2)(Q - 2) \leq 0$ , которое после раскрытия скобок приводится к виду  $S_1/2 - S_2 + 2 > Q$ .

Полученные границы позволяют контролировать результат, принимая его достоверным в пределах границ. Это позволяет оценить вероятность обнаружения или пропуска ошибки как функцию от ее величины.

Для двуместных операций из неравенства границы результату следуют ограничения сверху и снизу, накладываемые на операнды при условии обнаружения или пропуска ошибки. Разность ограничений одного операнда составляет диапазон его изменения в виде функции, интегрирование которой по ограничениям второго операнда определяет множество случаев обнаружения или пропуска ошибки, а отнесение к общему количеству случаев оценивает соответствующую вероятность. С увеличением ошибки растет множество случаев ее обнаружения, повышая вероятность обнаружения ошибки.

### 3. Модели представления вычислительной операции в контроле

Следующая группа моделей определяет представление вычислительной операции в контроле. Рабочее диагностирование матричных структур выполняется, как правило, в рамках модели единой операции, представленной полным составом разрядов операндов и результатов. С одной стороны, это обеспечивает возможности организации контрольных вычислений без каких-либо ограничений в пространственном доступе к разрядам, но с другой стороны, позволяет оценивать результат операции только после ее полного завершения. Исключение составляет только сканирующий контроль и его развитие в посегментном контроле. Эти методы выполня-

ются над отдельными разрядами операндов и результатов, связанных общей обособленной для них аппаратной реализацией. Такой подход к рабочему диагностированию дает косвенную оценку результата по отдельным его сегментам, вычисленным при выполнении операции над разными значениями сооперандов.

Поразрядная конвейеризация вычислений может диагностироваться в рамках новых моделей представления операции в контроле. К ним относится модель декомпозиции операции на множество поразрядных операций, контроль которых позволяет оценивать правильность вычислений в процессе выполнения операции. Наиболее перспективной является модель декомпозиции операции на множество операций с нарастающей разрядностью операндов, которая позволяет оценивать результат по мере вычисления его разрядов. Эта модель применима для сложения, а также для умножения, которое выполняется начиная со старших разрядов [16].

### 4. Модели доступа к данным

Для рабочего диагностирования поразрядных конвейеров важное место занимают модели доступа к данным, определяющие положение разрядов двоичных кодов операндов и результатов в регистровых структурах на различных тактах выполнения операции. Модели связывают номер  $i$  разряда последовательного двоичного кода, номер  $j$  такта и номер  $k$  разряда регистра.

В  $n$ -разрядном регистре сдвига  $i$ -й разряд вдвигаемого  $m$ -разрядного двоичного кода доступен в тактах  $j = i, \dots, n + i - 1$  на выходе разряда  $k = j - i + 1$  регистра, что описывается как

$$i = 1, \dots, n; j = i, \dots, n + i - 1; k = j - i + 1.$$

Последовательный доступ к разрядам  $2n$ -разрядного кода в регистровой структуре, сдвигающей код по два разряда  $2h - 1$  и  $2h$  в такте,  $h = 1, \dots, n$ , представляется моделью с отдельным описанием четных и нечетных разрядов:

$$i = 2h - 1, h = 1, \dots, n; j = 2h - 1; h.$$

$$i = 2h, h = 1, \dots, n; j = 2h; h + 1.$$

Последовательный доступ к разрядам  $2n$ -разрядного двоичного кода в регистре, сдвигающем код с удвоенной частотой, описывается следующей моделью:

$$i = 1, \dots, 2n; j = 2i - 1; k = i.$$

Модели доступа к данным позволяют формализовать процедуры выбора операндов и ре

зультатов для проверки контрольных соотношений в поразрядных конвейерных системах.

## 5. Заключение

Модели являются базовыми ресурсами, в рамках которых развиваются методы и средства. Объекты рабочего диагностирования в настоящее время развиваются в основном в рамках модели матричных вычислений, которые уже в существенной мере проявляют ограничения для дальнейшего развития ИТ-технологий. Низкий показатель отношения производительности к энергопотреблению ограничивает совершенствование мобильных систем и зеленых технологий. Проблема скрытых неисправностей, характерная для матричных структур, подрывает устои функциональной безопасности систем критического применения, которые становятся естественным окружением человека, растут количественно и качественно, повышая сложность, мощность и требуя соответствующего развития объектов и ресурсов рабочего диагностирования.

Один из подходов к сокращению матричных структур состоит в поразрядной конвейеризации вычислений, развитие которой предполагает совершенствование действующих и разработку новых моделей рабочего диагностирования.

Модель приближенных данных позволяет различать ошибки, существенные и несущественные для достоверности результатов, и развивать методы рабочего диагностирования, оценивающие величину ошибки, к которым относится контроль по неравенствам. В его основе лежат модели результата, служащие ему верхней и нижней границами на основании ограничений, накладываемых на операнды используемыми форматами данных.

Поразрядная конвейеризация вычислений расширяет множество моделей выполнения операции, дополняя модель единой операции, характерной для матричных структур, моделями декомпозиции операции на множество поразрядных операций и на множество операций с нарастающей разрядностью операндов, позволяющих оценивать результат в процессе его вычисления.

Поразрядная конвейеризация вычислений нуждается также в развитии моделей доступа к данным, разряды которых доступны в рамках определенных зависимостей между номерами разрядов данных, регистровых структур и тактов.

## Список использованной литературы

1. Nicolaidis, M. On-Line Testing for VLSI – a Compendium of Approaches. Electronic Testing: Theory and Application (JETTA) [Text] / M. Nicolaidis, Y. Zorian // Journal of Electronic

Testing: Theory and Applications. – 1998. – Vol. 12. – P. 7–20.

2. Drozd, J. Models, methods and means as resources for solving challenges in co-design and testing of computer systems and their components [Text] / J. Drozd, A. Drozd // Digital Technologies: Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference, Zhilina, Slovak Republic, 2013. – P. 176–180.

3. Drozd, J. Green IT engineering in the view of resource-based approach [Text] / J. Drozd, A. Drozd, S. Antoshchuk // In book: Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures, Studies in Systems, Decision and Control, V. Kharchenko, Y. Kondratenko, J. Kacprzyk (Eds.), Vol. 74. Berlin, Heidelberg: Springer International Publishing, 2017. – P. 43–65.

4. Drozd, J. Effectiveness of Matrix and Pipeline FPGA-Based Arithmetic Components of Safety-Related Systems [Text] / J. Drozd, A. Drozd, S. Antoshchuk, A. Kushnerov, V. Nikul // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: Proceedings of 8th IEEE International Conference, Warsaw, Poland, 2015. – P. 785–789.

5. Goldberg, D.: What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic [Text] / D. Goldberg // ACM Computer Surveys. – 1991. – Vol. 23, No 1. – P. 5–18.

6. Kharchenko, V. S. FPGA-based NPP I&C Systems: Development and Safety Assessment [Text] / V. S. Kharchenko [et al.]: V. S. Kharchenko, V. V. Sklyar (edits). – Kharkiv. RPC Radiy, National Aerospace University “KhAI”, SSTC on Nuclear and Radiation Safety, 2008. – 188 p.

7. IEC 61508-1:2010. Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety related systems – Part 1: General requirements. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010.

8. Drozd, M. Safety-Related Instrumentation and Control Systems and a Problem of the Hidden Faults [Text] / M. Drozd, A. Drozd // Digital Technologies: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference, Zhilina, Slovak Republic, 9 – 11 July 2014. – P. 137–140.

9. Drozd, A. The problem of on-line testing methods in approximate data processing [Text] / A. Drozd, M. Lobachev, J. Drozd // On-Line Testing: Proceedings of 12th IEEE International Symposium, Como, Italy, 10 – 12 July 2006. – P. 251–256.

10. IEEE Std 754™-2008 (Revision of IEEE Std 754-1985) IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. IEEE 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997, USA, 2008.

11. Drozd, A. New on-line testing methods for approximate data processing in the computing circuits [Text] / A. Drozd, S. Antoshchuk // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications: Proceedings of 6th IEEE International Conference, Prague, Czech Republic, 2011. – Vol. 1. – P. 15–17.

### References

1. Nicolaidis, M., Nicolaidis, M., Zorian Y. 1998, On-Line Testing for VLSI – a Compendium of Approaches. Electronic Testing: Theory and Application (JETTA). Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. vol. 12, pp. 7–20.

2. Drozd, J., Drozd, A. 2013, Models, methods and means as resources for solving challenges in co-design and testing of computer systems and their components. Proceedings of the Ninth International Conference on Digital Technologies. Zhilina, Slovak Republic, pp. 176–180.

3. Drozd, J., Drozd, A., Antoshchuk, S. 2017, Green IT engineering in the view of resource-based approach. In book: Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures, Studies in Systems, Decision and Control, V. Kharchenko, Y. Kondratenko, J. Kacprzyk (Eds.), vol. 74. Berlin, Heidelberg: Springer International Publishing, pp. 43–65.

4. Drozd, J., Drozd, A., Antoshchuk, S., Kushnerov, A., Nikul, V. 2015, Effectiveness of Matrix and Pipeline FPGA-Based Arithmetic Components of Safety-Related Systems. Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems:

Technology and Applications. Warsaw, Poland, pp. 785–789.

5. Goldberg, D. 1991, What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic. ACM Computer Surveys. vol. 23, no 1, pp. 5–18.

6. Kharchenko, V. S., Sklyar, V. V. 2008, FPGA-based NPP I&C Systems: Development and Safety Assessment. RPC Radiy, NAU “KhAF” Publ., SSTC on Nuclear and Radiation Safety, 188 p.

7. IEC 61508-1:2010. Functional safety of electrical / electronic / programmable electronic safety related systems – Part 1: General requirements. – Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010.

8. Drozd, M., Drozd, A. 2014, Safety-Related Instrumentation and Control Systems and a Problem of the Hidden Faults. Proceedings of the 10th International Conference on Digital Technologies. Zhilina, Slovak Republic, pp. 137–140.

9. Drozd, A., Lobachev, M., Drozd, J. 2006, The problem of on-line testing methods in approximate data processing. Proceedings of 12th IEEE International On-Line Testing Symposium. Como, Italy, pp. 251–256.

10. IEEE Std 754™-2008 (Revision of IEEE Std 754-1985) IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. IEEE 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997, USA, 2008.

11. Drozd, A., Antoshchuk, S. 2011, New on-line testing methods for approximate data processing in the computing circuits. Proceedings of IEEE 6th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. Prague, Czech Republic, pp. 15–17.

## MODELS OF ON-LINE TESTING A BITWISE PIPELINE SYSTEM

M. M. Al-Dabi, A. B. Drozd, M. A. Drozd

Odessa National Polytechnic University

**Abstract.** Shortcomings of array structures of the modern pipeline computer systems are analyzed, including information managing directors of system of critical application. Feasibility of abbreviation of array structures justifies need of development of resources – models, methods and means – for on-line testing of bitwise pipeline system. On the basis of resource approach the models determining further enhancement of methods and means of on-line testing of bitwise pipelines including models of data and a result, an operation and data access are offered and develop. The data model which gained development from integer numbers to approximate ones in floating point formats distinguishes most and least significant bits in which faults of digital circuits cause respectively essential and inessential errors in relation to trustworthiness of result. In order to detect essential errors, the models are developed for methods checking the calculated results by inequalities. The model of operation determines accessibility of result to its assessment by methods and means of on-line testing. Result models, serving for it by the lower and upper boundaries, are defined and evaluated, following from restrictions which are superimposed on operands by the used data formats. Models of data access formalize procedures of a choice of operands and results for verification of check ratios in bitwise pipeline systems. Models are considered for key operation of approximate calculations – multiplication, and also for inverse operation of division.

**Key words:** resource-based approach, on-line testing, bitwise pipeline system, models of data and a result, models of an operation and data access.

## МОДЕЛІ РОБОЧОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ПОРОЗРЯДНОЇ КОНВЕЄРНОЇ СИСТЕМИ

**М. М. Аль-Дабі, О. В. Дрозд, М. О. Дрозд**  
Одеський національний політехнічний університет

**Анотація.** Обґрунтовується необхідність розвитку ресурсів – моделей, методів та засобів – для робочого діагностування порозрядної конвеєрної системи. Розглядаються особливості робочого діагностування порозрядних конвеєрів. На основі ресурсного підходу пропонуються та розвиваються моделі, що визначають подальше вдосконалення методів та засобів робочого діагностування, включаючи моделі даних і результату, моделі операції та доступу до даних.

**Ключові слова:** ресурсний підхід, робоче діагностування, порозрядна конвеєрна система, моделі даних і результату, моделі операції та доступу до даних.

Получено 20.01.2017



Аль-Дабі Мохаммед Мохаммед, магістр, аспірант кафедри комп'ютерних інтелектуальних систем і мереж Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченко, 1, Одеса, Україна, E-mail: [aldhabi@mail.ru](mailto:aldhabi@mail.ru), тел.: (048)705-8330

Al-Dhabi Mohammed Mohammed, Master, postgraduate student at the Department of Computer Intellectual Systems and Networks of Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0002-7045-9410



Дрозд Александр Валентинович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних інтелектуальних систем і мереж Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченко, 1, Одеса, Україна, E-mail: [drozd@ukr.net](mailto:drozd@ukr.net), тел.: (048)705-8330.

Alex Drozd, Dr. of Science, Professor, Professor at the Department of Computer Intellectual Systems and Networks of Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0003-2191-6758



Дрозд Мирослав Александрович, кандидат технічних наук, старший преподаватель кафедри інформаційних систем Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченко, 1, Одеса, Україна, E-mail: [miroslav\\_dr@mail.ru](mailto:miroslav_dr@mail.ru), тел.: (048)705-8566.

Miroslav Drozd, Ph.D., Senior Lecturer at the Department of Information Systems of Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0003-0770-6295