

УДК 004.052

**Ю. В. Дрозд**, канд. техн. наук,  
**А. В. Дрозд**, д-р техн. наук,  
**М. М. Аль-Даби**

### МНОГОПОТОЧНАЯ КОНВЕЙЕРНАЯ СИСТЕМА И ЕЕ РАБОЧЕЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

**Аннотация.** Рассматривается развитие компьютерных систем и их компонентов по пути повышения уровня развития ресурсов – моделей, методов и средств – от точных и последовательных форм к параллельным и приближенным. Повышение уровня обеспечивается переходом от конвейерной системы, составленной из одноктактных матричных устройств, к матрице поразрядных конвейеров для многопоточной обработки данных в последовательных кодах с улучшенным соотношением производительности к сложности. Для повышения достоверности результатов совершенствуется модель данных, от точных к приближенным, и предлагается развитие сканирующего контроля, достоверность которого растет с увеличением количества параллельно работающих конвейеров.

**Ключевые слова:** компьютерная система, матричный и конвейерный параллелизм, модели и методы, многопоточная обработка данных, производительность, сложность, достоверность, сканирующий контроль

**J. Drozd**, PhD.,  
**A. Drozd**, ScD.,  
**M. Al-Dhabi**

### MULTITHREADING PIPELINE SYSTEM AND ITS ON-LINE TESTING

**Abstract:** Development of computer systems and their components on the way of increasing a development level of resources – models, methods and means – from exact and consecutive forms to parallel and approximate is considered. Increase of level is provided with transition from the pipeline system made of single-cycle matrix units to a matrix of digit-by-digit pipelines for multithreading data processing in consecutive codes with the improved ratio of productivity to complexity. For increase of results reliability the model of data from exact to approximate is improved, and development of the scan checking which reliability grows with increase in number in parallel of the working pipelines is offered.

**Keywords:** computer system, matrix and pipeline parallelism, models and methods, multithreading data processing, throughput, complexity, trustworthiness, scan checking

**Ю. В. Дрозд**, канд. техн. наук,  
**О. В. Дрозд**, д-р техн. наук,  
**М. М. Аль-Даби**

### БАГАТОПОТОКОВА КОНВЕЄРНА СИСТЕМА ТА ЇЇ РОБОЧЕ ДІАГНОСТУВАННЯ

**Анотація:** Розглядається розвиток комп'ютерних систем і їх компонентів по шляху підвищення рівня розвитку ресурсів – моделей, методів і засобів – від точних і послідовних форм до паралельних і наближених. Підвищення рівня забезпечується переходом від конвеєрної системи, складеної з одноктактних матричних вузлів, до матриці порозрядних конвеєрів для багатопотокової обробки даних у послідовних кодах з поліпшеним співвідношенням продуктивності до складності. Для підвищення достовірності результатів удосконалюється модель даних, від точних до наближених, і пропонується розвиток скануючого контролю, достовірність якого росте зі збільшення кількості паралельно працюючих конвеєрів.

**Ключові слова** комп'ютерна система, матричний і конвеєрний паралелізм, моделі й методи, багатопотокова обробка даних, продуктивність, складність, достовірність, скануючий контроль

**Введение.** Развитие компьютерных систем и их компонентов происходит по законам интеграции искусственного мира, создаваемого человеком, в естественный мир. Этот процесс наиболее наглядно протекает в компьютерном мире, динамично повторяющем развитие естественного мира в сжатые сроки. Неадекватное развитие компьютерного мира вызывает в естественном мире возмущения, возвращающиеся в виде проблем, решение которых и составляет интеграционный процесс, изучаемый в ресурсном подходе [1].

Согласно этому подходу, проблема решается при выполнении трех условий: достижении производительности, необходимой для выполнения полного объема работ за ограниченное время, требуемой

достоверности получаемых результатов и привлечении ресурсов, обеспечивающих производительность и достоверность. Поэтому ресурсы – это все необходимое для решения проблемы, т.е. модели, методы и средства. Модели – представления человека о мире и его компонентах, методы содержат описания преобразований и оценки ресурсов. Модели и методы составляют информационную часть ресурсов. Они записаны в структуре и функционировании материальных носителей, которыми являются средства (материалы и инструменты), относящиеся к технологической части ресурсов.

Ресурсы развиваются от простого к реальному по естественному пути структурирования под особенности естественного мира. Среди этих особенностей наиболее проявленными в компьютерном мире являются

параллелизм и приближенность. Простые формы ресурсов соответствуют начальным представлениям и возможностям человека – точным и последовательным, а реальные – отражают параллельный и приближенный естественный мир. Ресурсный подход выделяет в развитии ресурсов по возрастающей три уровня: репликацию, диверсификацию и автономизацию, относя матричный и конвейерный виды параллелизма, используемые в компьютерных системах, соответственно к первым двум уровням.

В настоящее время компьютерные системы и их компоненты строятся конвейерными. В качестве участков конвейера используются одноканальные узлы с матрицей операционных элементов для обработки числовых данных в параллельных кодах. Матричный параллелизм ограничен зависимостью по данным, когда вычислительная операция не выполняется, если еще не получены ее операнды, т.е. получение операндов и операция выполняются последовательно [2]. Это снижает коэффициент использования операционных элементов в такте конвейера. Например, почти  $10^3$  операционных элементов, составляющих 32-разрядный матричный умножитель двоичных кодов, используются только на 1,6 % времени вычислений [3]. Следствием является низкий уровень отношения производительности к сложности современных компьютерных систем. Для его повышения следует приблизиться к следующему уровню развития ресурсов, снижая долю матричного параллелизма на участке конвейера вплоть до одного операционного элемента для обработки данных по одному разряду в каждом такте. Тогда конвейер становится поразрядным обработчиком данных в последовательных кодах. Все разряды обрабатываются одновременно на разных участках конвейера. Матрица таких независимых (по данным) параллельно работающих конвейеров образует многопоточную систему с требуемой производительностью и повышенным отношением производительности к сложности, т.е. ресурсопотреблению [4].

Дальнейшее развитие многопоточной системы поразрядных конвейеров связано с обеспечением достоверности вычисляемых результатов. Данная статья предлагает одно из решений этой задачи с использованием ресурсов рабочего диагностирования компьютерных систем и их компонентов.

**Модели рабочего диагностирования.** Основное развитие рабочего диагностирования, приходящееся на наиболее продолжительный этап становления, протекало в рамках модели точных данных, которая все числа независимо от их настоящей природы относит к точным – номерам элементов множеств. На основе этой модели рабочее диагностирование было распространено на собственные средства путем разработки цифровых схем, полностью самопроверяемых для заданного множества неисправностей [5]. Из определений защищенной, самотестируемой и полностью самопроверяемой схемы следует цель рабочего диагностирования – оценка средств решения задачи путем обнаружения их неисправностей, а также требования к методам – обнаруживать неисправности цифровой схемы по первой ошибке результата [6].

История развития компьютерных систем свидетельствует о доминирующем совершенствовании методов и средств обработки приближенных данных. Аппаратная поддержка приближенных вычислений в персональных компьютерах прошла путь от сопроцессоров необязательной поставки (Intel 8087/287/387) до нескольких конвейеров с плавающей точкой в центральном процессоре семейства Pentium и нескольких тысяч конвейеров, параллельно работающих в графическом процессоре [7].

В модели приближенного данного разряды результата разбиваются на два множества: старшие верные и младшие неверные [8]. Неисправности цифровой схемы вызывают в них ошибки, которые являются соответственно существенными и несущественными для достоверности результата [9].

Получает развитие цель рабочего диагностирования, определяемая как оценка достоверности результата. Предшествующая и настоящая цели неразличимы в рамках модели точных данных, поскольку любая ошибка в точном данном является существенной, а ее обнаружение одновременно указывает и на наличие неисправности в схеме, и на вычисление недостоверного результата.

**Методы рабочего диагностирования.** В рамках новой модели пересматриваются требования к методам рабочего диагностирования: они должны быть достоверны в оценке результата как достоверного или недостоверного, т.е. обнаруживать существенные ошибки и игнорировать несущественные.

Достоверность методов 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 впервые становятся приближенными, т.е. более адекватными естественному миру, поскольку могут ошибаться при обнаружении несущественной ошибки, а граница между верными и неверными разрядами является размытой.

Для полностью самопроверяемых схем вероятность  $P_O = 1$  (в заданном множестве неисправностей), а вероятность  $P_C \ll 0,5$  (с учетом точного выполнения операций и одинарной точности вычислений [11]), что, согласно (1), определяет низкую достоверность  $D \ll 0,5$ .

Анализ формулы (1) показывает два пути повышения достоверности методов, когда оба параметра  $P_C$  и  $P_O$  одновременно больше или меньше отметки 0,5. По первому пути разработаны методы контроля по модулю сокращенных арифметических операций, для которых достижимо  $P_C > 0,5$ . По второму пути разработаны две группы методов: с использованием естественной информационной избыточности результатов арифметических операций и по упрощенной операции. Существует также третий путь повышения достоверности методов рабочего диагностирования, в основе которого лежит обнаружение существенных ошибок с большей вероятностью, чем несущественных. По этому пути разработаны методы логарифмического контроля,

контроля по неравенствам и по сегментам, позволяющие оценивать величину ошибки [12].

**Выбор и развитие метода контроля для многопоточной системы.** К особенностям рассматриваемой системы, которые целесообразно принять во внимание при выборе метода и его развитии, следует отнести однородность структуры, элементами которой являются поразрядные конвейеры, а также вычисление результата на множестве тактов и арифметический тип ошибки при выполнении вычислительных операций. Из перечисленных групп методов однородность структуры учитывается только в контроле по сегментам, включая сканирующий контроль, который разбивает результат на выходе одноканального устройства на одинаковые сегменты разрядов, проверяемые последовательно [12].

Предлагается развитие метода и средств сканирующего контроля для последовательной проверки результатов, вычисляемых на выходах конвейеров. Для этого многопоточная система дополняется узлом контроля и средствами его подключения ко входам и выходам заданного поразрядного конвейера на время получения операндов и результата операции, соответственно. Узел контроля устанавливает соответствие результата операндам путем сравнения результатов или их контрольных характеристик, вычисленных по операндам и результату. Сравнение результатов может быть выполнено вычитанием или с использованием контрольных характеристик методов третьего пути. Это позволяет оценить величину ошибки и идентифицировать ее как существенную или несущественную по отношению к различающему их пороговому значению. Порог может устанавливаться или вычисляться, например, путем понижения или повышения значения при каждом обнаружении существенной или несущественной ошибки.

Для наиболее распространенного случая  $P_C \ll 0,5$  рост количества  $n$  параллельно работающих конвейеров многопоточной системы снижает вероятность  $P_C = 1/n$  и в соответствии с формулой (1) повышает достоверность сканирующего контроля. Например, для  $P_C = 0,1$  рост  $n$  от 4 до 8 повышает достоверность  $D$  от 0,7 до 0,8. Это является важной оценкой сканирующего контроля с позиции его совершенствования при распараллеливании вычислений.

**Выводы.** Условия решения проблемы определяют и основные показатели этого решения (процесса и результата) – производительность, достоверность и ресурсопотребление, которые могут быть улучшены путем повышения уровня развития ресурсов: моделей методов и средств.

Для компьютерных систем отношение производительности к сложности (ресурсопотреблению) повышается с переходом от конвейера, составленного из одноканальных матричных устройств, к матрице поразрядных конвейеров. Достоверность такой многопоточной системы повышается при развитии модели данных от точных к приближенным. Особенности многопоточной системы наилучшим образом учитываются при использовании метода сканирующего контроля, который получает дальнейшее развитие для

матрицы поразрядных конвейеров с возможностью оценки величины ошибки и ее идентификации как существенной или несущественной. С ростом количества параллельно работающих конвейеров достоверность метода сканирующего контроля повышается, например, в приведенном примере – на 0,1.

#### Список использованной литературы

1. Drozd J., and Drozd A., (2013), Models, Methods and Means for Solving the Challenges in Co-Design and Testing of Computer Systems and their Components, *Reliability: Theory & Applications*, San Diego, USA, Vol. 8, No. 4 (31), pp. 66 – 74.
2. Tanenbaum A., (1999), *Structured Computer Organization*, 4<sup>th</sup> ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 698 p.
3. Drozd M., and Drozd A., (2014), Safety-Related Instrumentation and Control Systems and a Problem of the Hidden Faults, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Digital Technologies*, Zhilina, Slovak Republic, July 2014, pp. 137 – 140.
4. Drozd A., and Drozd M., (2014), A new Approach to Solving a Problem of the Hidden Faults in Safety-Related Systems, *Journal of Information, Control and Management Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 125 – 132.
5. Anderson D.A., and Metze G., (1977), Design of Totally Self-checking Check circuits for m-out-of-n codes, *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C –22, No. 3, pp. 263 – 269.
6. Metra C., Schiano L., Favalli M., and Ricco B., (2002), Self-checking Scheme for the on-line Testing of Power Supply Noise, *Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference*, Paris, France, March 2002, pp. 832 – 836.
7. Гук М. Аппаратные средства IBM PC: Энциклопедия. – 2-е изд. / М. Гук – СПб : Питер, 2003. – 928 с.
8. Демидович Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – М. : Физматгиз, 1966. – 664 с.
9. Drozd A., (2003), On-line Testing of Computing Circuits at Approximate Data Processing, *Radioelectronics & Informatics*, No. 3, pp. 113 – 116.
10. Drozd A., Lobachev M., and Drozd J., (2006), The Problem of on-line Testing Methods in Approximate data Processing, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> IEEE International On-Line Testing Symposium*, Como, Italy, July 2006, pp. 251 – 256.
11. Goldberg D., (1991), What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic, *ACM Computer Surveys*, Vol. 23, No. 1, pp. 5 – 18.
12. Drozd A., Lobachev M., and Drozd J., (2006), The Problem of on-line Testing Methods in Approximate data Processing, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> IEEE International On-Line Testing Symposium*, Como, Italy, July 2006, pp. 251 – 256.

Получено 25.05.2015

### References

1. Drozd J., and Drozd A., (2013), Models, Methods and Means for Solving the Challenges in Co-Design and Testing of Computer Systems and their Components, *Reliability: Theory & Applications*, San Diego, USA, Vol. 8, No. 4 (31), pp. 66 – 74.
2. Tanenbaum A., (1999), Structured Computer Organization, 4<sup>th</sup> ed., *Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall*, 698 p.
3. Drozd M., and Drozd A., (2014), Safety-Related Instrumentation and Control Systems and a Problem of the Hidden Faults, *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Digital Technologies*, Zhilina, Slovak Republic, July 2014, pp. 137 – 140.
4. Drozd A., and Drozd M., (2014), A new Approach to Solving a Problem of the Hidden Faults in Safety-Related Systems, *Journal of Information, Control and Management Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 125 – 132.
5. Anderson D.A., and Metz G., (1977), Design of Totally Self-checking Check Circuits for m-out-of-n Codes, *IEEE Trans. Comput.*, Vol. C – 22, No. 3, pp. 263 – 269.
6. Metra C., Schiano L., Favalli M., and Ricco B., (2002), Self-checking Scheme for the on-line Testing of Power Supply Noise, *Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference*, Paris, France, March 2002, pp. 832 – 836.
7. Guk M., Apparativnye sredstva IBM PC: Encyclopedia [Hardware IBM PC: Encyclopedia], (2003), *SPb: Piter.*, Petersburg, Russian Federation, 928 p. (In Russian).
8. Demidovich B.P., and Maron I.A. Osnovi vychislitel'noy matematiki [Foundations of Computing Mathematics], (1966), Moscow, Russian Federation, *Fizmatgiz*, 664 p. (In Russian).
9. Drozd A., (2003), On-line Testing of Computing Circuits at Approximate Data Processing, *Radioelectronics & Informatics*, No. 3, pp. 113 – 116.
10. Drozd A., Lobachev M., and Drozd J., (2006), The Problem of on-line Testing Methods in Approximate Data Processing, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> IEEE International On-Line Testing Symposium*, Como, Italy, July 2006, pp. 251 – 256.
11. Goldberg D., (1991), What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic, *ACM Computer Surveys*, Vol. 23, No. 1, pp. 5 – 18.
12. Drozd A., Lobachev M., and Drozd J., (2006), The Problem of on-line Testing Methods in Approximate Data Processing, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> IEEE International On-Line Testing Symposium*, Como, Italy, July 2006, pp. 251 – 256.



Дрозд  
Юлия Владимировна,  
к.т.н., доц., доц. каф. информаци-  
онных систем Одесского  
национального политехниче-  
ского 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. ком-  
пьютерных интеллектуальных  
систем и сетей Одесского  
национального политехниче-  
ского ун-та, пр. Шевченко, 1.  
г. Одесса, Украина,  
тел.: (048)705-8330.  
E-mail: drozd@ukr.net



Аль-Даби  
Мохаммед Мохаммед,  
аспирант каф. компьютер-  
ных интеллектуальных си-  
стем и сетей Одесского  
национального политехни-  
ческого ун-та, пр. Шевчен-  
ко, 1. г. Одесса, Украина,  
тел.: (048)705-8330.  
E-mail: aldhabi@mail.ru