

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИНФОРМАЦИИ В ЦИФРОВЫХ КОМПОНЕНТАХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

Юлия Дрозд¹⁾, Александр Дрозд²⁾, Мохаммед Аль-Дабби³⁾

*^{1) 2) 3)} ОНПУ, 65 044 Украина, г. Одесса, пр. Шевченко, 1
e-mails: 1)dea_lucis@ukr.net, 2)drozd@ukr.net, 3)aldhabi@mail.ru*

Резюме: Рассматриваются методы контроля информации в составе цифровых компонентов компьютерных систем. Их особенностью является обработка результатов измерений, являющихся приближенными данными, и их представление точными двоичными кодами. Это определило сложный путь развития методов контроля информации и представлений о них. Развитие модели данных показало низкую достоверность методов с традиционно высокой вероятностью обнаружения ошибки. Показаны пути повышения достоверности методов, основанные на различении существенных и несущественных ошибок. Предлагается развитие сканирующего контроля для многопоточных систем поразрядных конвейеров.

Ключевые слова: методы контроля информации, компьютерная система, цифровой компонент, рабочее диагностирование, модель точных и приближенных данных, достоверность методов, сканирующий контроль.

Введение

Как правило, цифровые компоненты компьютерных систем, например, арифметические устройства, обрабатывают результаты измерений, т.е. приближенные данные, но представленные двоичными кодами, которые являются целыми по своей природе, и в этом смысле их можно считать точными. Приближенное число характеризуется погрешностью и при его использовании принимается достоверным в пределах этой погрешности, т.е. погрешность является жизненным пространством числа. Когда результат измерений подменяется двоичным кодом погрешность остается и даже растет, а жизненное пространство устранивается. Как это сказывается на обработке чисел и проявляется в области контроля информации? Ответ на этот вопрос требует изучения процесса совершенствования методов и схем контроля информации, а также нашего представления о них.

Данная статья показывает развитие методов контроля от поиска неисправностей до оценки достоверности результатов вычислений, изменение представлений о достоверности методов от близкой к единице до приближающейся к нулю, а также пути повышения достоверности

1. Развитие методов и схем контроля

В цифровые компоненты компьютерных систем встраиваются схемы контроля для одновременной работы с основными схемами компонента в процессе решения вычислительных задач. Что контролируют эти схемы? Этот вопрос следует адресовать технической диагностике, той ее части, которая отвечает за выполнение основных

вычислений. В разное время такую диагностику или такой контроль называли аппаратным в отличие от программного, встроенным, поскольку не может быть выносным. В настоящее время называют функциональным или рабочим в отличие от тестового, т.к. осуществляется при выполнении основных функций на рабочих входных словах, а не на тестовых в паузах основного функционирования [1].

В англоязычных публикациях можно встретить названия «built-in checking», «concurrent error detection» и наиболее часто – «on-line testing» [2].

На начальном этапе рабочее диагностирование (РД) наследовало модели, методы и средства из теории и практики помехоустойчивого кодирования, Кодеры и декодеры в процессе передачи данных считались абсолютно надежными и проверялись только тестами в паузах работы. Они стали прообразами схем контроля, на которые РД было распространено только с 1968 г., когда стала развиваться теория и практика построения полностью самопроверяемых схем: защищенных с обнаружением неисправности по первой ошибке и самотестируемых, т.е. ориентированных на обнаружение первой неисправности до появления второй [3, 4]. Определения полностью самопроверяемых схем основываются на обработке двоичных кодов без учета погрешностей. Эти определения на несколько десятилетий зафиксировали цель РД как контроль схемы обнаружением неисправности, а также требования к методам контроля – обнаруживать неисправность цифровой схемы по первой ошибке.

Как показывает ресурсный подход, описы-

вающий интеграцию компьютерного мира в естественный, ресурсы, т.е. модели, методы и средства, развиваются от простого к реальному по естественному пути структурирования под особенности естественного мира. Простыми являются последовательные и точные формы, в соответствии с исходными представлениями и возможностями человека, а реальными – параллельные и приближенные, характеризующие естественный мир [5].

Поэтому нарастает значимость обработки приближенных данных, меняя модель данных от точных к приближенным, которые характеризуются старшими верными разрядами и младшими неверными, вес которых лежит ниже уровня погрешности [6]. Неисправности цифровых схем вызывают в этих разрядах ошибки, являющиеся для достоверности результата вычислений соответственно существенными и несущественными [7].

Корректируется цель РД как контроль достоверности результата вычислений, что для точных данных трактовалось как контроль схемы, поскольку все ошибки являются существенными, а их обнаружение свидетельствует и о неисправности схемы, и о недостоверном результате.

Методы РД впервые признаются методами контроля информации, а не схемы.

2. Достоверность методов контроля

Для оценки достоверности методов контроля используется квадрат с единичной длиной сторон, показанный на рис. 1 [8].

		P_C	P_H
P_O	1	P_{CO}	2 P_{HO}
P_{II}	3	P_{CII}	4 P_{HII}

Рис. 1. Оценка достоверности методов контроля

На горизонтальной стороне квадрата показываются вероятности P_C и $P_H = 1 - P_C$ того, что ошибка является существенной и несущественной, а на вертикальной – вероятности P_O и $P_{II} = 1 - P_O$ обнаружения и пропуска ошибки.

Квадрат делится на 4 части: вероятности

$P_{CO} = P_C P_O$ и $P_{HO} = P_H P_O$ обнаружения существенной и несущественной ошибки, а также их пропуска: $P_{CII} = P_C P_{II}$ и $P_{HII} = P_H P_{II}$.

Согласно устаревшей цели, метод достоверен, если обнаруживает неисправность, независимо от того, является ли ошибка существенной или нет, т.е. достоверность определяется суммой частей 1 и 2: $D_{yц} = P_C P_O + P_H P_O = P_O$.

Настоящая цель определяет метод достоверным, если он правильно оценивает результат как достоверный или недостоверный, т.е. при обнаружении существенной ошибки и пропуске несущественной ошибки (части 1 и 4), что определяет достоверность по формуле

$$D_{нц} = P_C P_O + P_H P_{II}. \quad (1)$$

Методы контроля, обеспечивающие полную самопроверяемость схем для заданного множества неисправностей, стали традиционными. Они обнаруживают эти неисправности с вероятностью $P_O = 1$, что характеризует их достоверность как $D_{yц} = 1$ и $D_{нц} = P_C$.

Традиционные методы разрабатывались для РД обработки двоичных кодов

Приближенные вычисления выполняются в форматах с плавающей точкой, особенности которых многократно снижают вероятность P_C .

Все эти форматы и двойные, и расширенные приобрели в результате развития одинарную точность, когда мантисса результата наследует разрядность операнда. При этом в самой записи числа с плавающей точкой присутствует умножение, что придает результатам всех операций над мантиссами свойства произведения, включая удвоение разрядности операнда для двухместных операций. Поэтому младшая половина результата обработки двоичных кодов мантисс отбрасывается (как содержащая заведомо неверные разряды), что снижает вдвое вероятность P_C . Мантисса и порядок числа взаимодействуют, используя денормализацию операндов и нормализацию результатов, что снижает количество верных разрядов и вероятность P_C для результатов всех предыдущих и последующих операций, соответственно.

Поэтому вероятность P_C и достоверность $D_{нц}$ традиционных методов контроля информации приближаются к нулю.

Возникает ряд вопросов. Как десятки лет методы контроля со столь низкой достоверностью считались достоверными?

Их маскировала модель точных данных, в рамках которой достоверность определяется как

$D_{\text{УЦ}}$ и совпадает вероятностью существенной ошибки $P_O = 1$.

А как же практика – критерий истины? Свидетельства практики – на стороне настоящей цели. Действительно, по первой ошибке обнаруживаются наиболее часто встречающиеся неисправности, т.е. сбои, а не отказы. Но обнаружение сбоя, как кратковременной самоустраивающейся неисправности, бессмысленно с позиции оценки схемы, а важно для оценки результата – можно его использовать или он не является достоверным.

Низкая достоверность традиционных методов проявляется в отбраковке ошибочных, но достоверных с вероятностью $P_H \rightarrow 1$ результатов. При решении широкого круга задач это допустимо, принимается как должное и ведет к незначительной потере производительности, затрачиваемой на пересчет достоверных результатов.

Вместе с тем, в рамках старой модели данных невозможно решать сложные задачи, возникающие на границах возможного, а от умения их решать зависит степень защищенности общества.

Примером может служить разработка вычислителя радиолокатора «Дон-2Н», системы ПРО А-135 [9]. Высокие требования к производительности обусловили полностью аппаратную реализацию, выполненную на элементах средней степени интеграции. Их значительное количество привело к непрерывному потоку сбоев и соответственно потоку ошибочных, но достоверных результатов на выходе вычислителя. В ходе совместного российско-американского эксперимента ("Одеракс") по отслеживанию малоразмерных космических объектов с космического корабля "Шаттл" в 1994 г. в открытый космос были выброшены металлические шары диаметром 5, 10 и 15 сантиметров. Пятисантиметровый шар был обнаружен только радиолокатором «Дон 2Н» на дальности 1500-2000 км [10].

В рамках модели точных данных ошибочные результаты надо было бы пересчитывать, получая опять ошибочные. Такая задача не имеет решения. Контроль информации должен быть направлен не на наилучшее обнаружение неисправностей, а на различение существенных и несущественных ошибок.

3. Пути повышения достоверности РД

В рамках модели приближенных данных открываются три пути повышения достоверности РД, в рамках которых разработаны 6 групп методов контроля [11].

Анализ формулы (1) показывает получение

$D_{\text{ИЦ}} > 0,5$ при вероятностях P_C и P_O , когда они обе больше или меньше 0,5.

Вероятность $P_C > 0,5$ может быть достигнута только для сокращенных операций, выполняемых с одинарной точностью [12]. По первому пути разработаны методы контроля по модулю сокращенных операций.

Наиболее распространенный случай $P_C < 0,5$ определяет второй путь, по которому разработаны две группы методов: использующие естественную информационную избыточность результатов арифметических операций и выполняющие контроль по упрощенной операции.

Существует также третий путь повышения достоверности, по которому существенные и несущественные ошибки обнаруживаются с различной вероятностью.

По этому пути разрабатываются методы, оценивающие величину ошибки. Среди них методы логарифмического контроля, контроля по неравенствам и по сегментам.

4. Ближайшие перспективы развития

Ресурсный подход выделяет три уровня развития ресурсов: нижний – репликацию, средний – диверсификацию и верхний – автономизацию, относя матричный и конвейерный параллелизм соответственно к первым двум [13].

Сейчас компьютерные системы строятся как конвейеры, секциями которых служат одноктактные устройства с матричным параллелизмом для обработки чисел в параллельных кодах. Доминирует матричный параллелизм, который проявляет ограничения по данным, когда обработка данных выполняется последовательно с процессом их получения. В матричном n -разрядном умножителе с наиболее быстрой структурой $2n - 2$ операционных элементов соединено последовательно, т.е. работают только $1 / (2n - 2)$ -ю часть такта [17]. Для $n > 51$ время работы каждого из почти n^2 операционных элементов составляет менее одного процента. Шаг к следующему уровню развития ресурсов – диверсификации – может быть сделан уменьшением матричного параллелизма секции конвейера до одного операционного элемента, т.е. переходом к поразрядной конвейерной обработке данных в последовательных кодах. В этом случае все разряды числа обрабатываются параллельно на разных участках конвейера. Необходимая производительность может быть достигнута организацией многопоточной системы, содержащей матрицу независимых по данным параллельно работающих поразрядных конвейеров.

Поэтому ближайшее развитие РД должно быть ориентировано на контроль информации в многопоточной системе поразрядных конвейеров. Ее однородная структура наилучшим образом учитывается в методе контроля по сегментам при его развитии как сканирующего контроля по одинаковым сегментам, в роли которых выступают отдельные разряды результатов. Все разряды последовательных кодов проходят по всем секциям конвейеров. Поэтому в основу различения существенных и несущественных ошибок должна быть положена идентификация тактов времени прохождения по конвейеру старших верных и младших неверных разрядов.

Заключение

Цифровые компоненты компьютерных систем и методы контроля несут в себе противоречие между приближенным характером обрабатываемых данных и их представлением точными по своей природе двоичными кодами.

Методы РД проявили себя как методы контроля информации в результате развития модели данных от точных к приближенным, согласно естественному пути развития ресурсов – моделей методов и средств – в параллельном и приближенном мире.

Наиболее продолжительный период развития РД методы контроля прошли в рамках теории и практики построения полностью самопроверяемых схем, где модель точных данных подменяла низкую достоверность методов на их высокую вероятность обнаружения ошибки.

Три пути повышения достоверности РД, открываемые моделью приближенных данных, определили 6 групп методов контроля информации, которые направлены не на улучшение обнаружения неисправностей, а на различение существенных и несущественных ошибок результатов вычислений.

Перспективы развития методов контроля информации связаны с совершенствованием компьютерных систем и их компонентов. С повышением уровня развития ресурсов можно ожидать распространения многопоточных систем поразрядных конвейеров и развития их сканирующего контроля с учетом параллельной обработки старших верных и младших неверных разрядов последовательных кодов.

Литература

[1] **П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян и др.** *Основы технической диагностики*. М.:

Энергия, 1981, 320 с.

[2] **M. Nicolaidis, Y. Zorian.** On-line testing for VLSI – a compendium of approaches. *Electronic Testing: Theory and Application (JETTA)*, vol. 12, 1998, P. 7-20.

[3] **D. A. Anderson, G. Metzger.** Design of totally self-checking check circuits for m-out-of-n code. *IEEE Trans. Comput.*, vol. C – 22, No 3, 1977, P. 263-269.

[4] **C. Metra, L. Schiano, M. Favalli, B. Ricco.** Self-checking scheme for the on-line testing of power supply noise. *Proc. Design, Automation and Test in Europe Conf*, 2002, P. 832-836, Paris, France.

[5] *Введение в Green IT: методология, технологии и применение* / Под ред. **В. С. Харченко**, Х.: Нац. аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2014, 594 с.

[6] **Б. П. Демидович, И. А. Марон.** *Основы вычислительной математики*, М.: Физматгиз, 1966, 664 с.

[7] **A. Drozd** On-line Testing of Computing Circuits at Approximate Data Processing. *Radioelectronics & Informatics*, № 3, 2003, P. 113-116.

[8] **A. Drozd, M. Lobachev, J. Drozd.** The problem of on-line testing methods in approximate data processing. *Proc. 12th IEEE International On-Line Testing Symposium*, July 2006, P. 251-256, Como, Italy.

[9] www.globalsecurity.org/wmd/world/russia/pill_box.htm.

[10] www.popmech.ru/article/4954-vosmoechudo-sveta.

[11] *Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем* / Под ред. **А. В. Дрозда, В. С. Харченко**, Х.: Нац. аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2012, 614 с.

[12] **О. В. Дрозд.** *Контроль за модулем общисловальных пристроїв*. Одеса: АО Бахва, 2002, 144 с.

[13] **А. О. Мельник.** *Архітектура комп'ютера*. Луцьк: Волинська обласна друкарня, 2008, 470 с.

Сведения об авторах

Дрозд Юлия Владимировна. Одесский политехнический институт (1990). к.т.н. (2000), доцент (2003); Одесский национальный политехнический университет, кафедра информационных систем. Научные интересы: цифровая обработка сигналов.

Дрозд Александр Валентинович. Одесский

политехнический институт (1976). Д.т.н. (2003), профессор (2004), Одесский национальный политехнический университет, кафедра компьютерных интеллектуальных систем и сетей. Научные интересы: методы контроля информации.

Аль-Дабби Мохаммед. Одесский политехнический институт (2013). Аспирант - кафедра компьютерных интеллектуальных систем и сетей. Научные интересы: методы контроля информации.

INFORMATION CHECKING METHODS IN DIGITAL COMPONENTS OF COMPUTER SYSTEMS

Julia Drozd¹⁾, Alex Drozd²⁾, Mohammed Al-dhabi³⁾

^{1) 2) 3)} ONPU, 65 044 Украина, г. Одесса, пр. Шевченко, 1
e-mails: ¹⁾dea_lucis@ukr.net, ²⁾drozd@ukr.net, ³⁾aldhabi@mail.ru

Abstract: Information checking methods as a part of digital components of computer systems are considered. Their feature is processing of results of the measurements which are approximate data and their representation by exact binary codes. It defined a difficult way of development of checking methods of information and ideas of them. Development of data model showed low reliability of methods with traditionally high probability of error detection. The ways of methods reliability increase based on distinction of essential and inessential errors are shown. Development of the scan checking for multithreaded systems of digit-by-digit pipelines is offered.

Key words: information checking methods, computer system, digital component, on-line testing, model of exact and approximate data, trustworthiness of methods, scan checking.

References

- [1] **P. P. Parkhomenko, E. S. Sogomonyan** a.o. *Foundations of engineering diagnostics*. M.: Energy, 1981, 320 p.
- [2] **M. Nicolaidis, Y. Zorian**. On-line testing for VLSI – a compendium of approaches. *Electronic Testing: Theory and Application (JETTA)*, vol. 12, 1998, P. 7-20.
- [3] **D. A. Anderson, G. Metze**. Design of totally self-checking check circuits for m-out-of-n code. *IEEE Trans. Comput.*, vol. C – 22, No 3, 1977, P. 263-269.
- [4] **C. Metra, L. Schiano, M. Favalli, B. Ricco**. Self-checking scheme for the on-line testing of power supply noise. *Proc. Design, Automation and Test in Europe Conf*, 2002, P. 832-836, Paris, France.
- [5] **V. S. Kharchenko (ed)**. *Introduction in Green IT: methodology, technologies and application*, National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky “KhAI”, Kharkiv, Ukraine, 2014, 594 p.
- [6] **B. P. Demidovich, I. A. Maron**. *Foundations of computational mathematics*, M.: Phismathgis, 1966, 664 c.
- [7] **A. Drozd** On-line Testing of Computing Circuits at Approximate Data Processing. *Radioelectronics & Informatics*, № 3, 2003, P. 113-116.
- [8] **A. Drozd, M. Lobachev, J. Drozd**. The problem of on-line testing methods in approximate data processing. *Proc. 12th IEEE International On-Line Testing Symposium*, July 2006, P. 251-256, Como, Italy.
- [9] www.globalsecurity.org/wmd/world/russia/pill_box.htm.
- [10] www.popmech.ru/article/4954-vosmoeschudo-sveta.
- [11] **A. Drozd, V. Kharchenko (Edits)**. *On line testing of the safe instrumentation and control systems*, National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky “KhAI”, Kharkiv, Ukraine, 2012, 614 p.
- [12] **O. V. Drozd**. *Residue Checking of computing devices*. Odessa: Bahva, 2002, 144 c.
- [13] **A. O. Melnik**. *Architecture of Computer*. Lutsk: Volinska oblasna drukarnja, Ukraine, 2008, 470 c.

МЕТОДИ ЗА КОНТРОЛ НА ИНФОРМАЦИЯТА В ЦИФРОВИТЕ КОМПОНЕНТИ НА КОМПЮТЪРНИ СИСТЕМИ

Юлия Дрозд¹⁾, Александ Дрозд²⁾, Мохаммед Аль-Дабхи³⁾

*1) 2) 3) ОНПУ, 65 044 Украйна, г. Одеса, пр. Шевченко, 1,
e-mails: ¹⁾dea_lucis@ukr.net, ²⁾drozd@ukr.net, ³⁾aldhabi@mail.ru*

Резюме: Разглеждат се методите за контрол на информацията в цифровите компоненти на компютърни системи. Тяхната особеност е обработката на резултатите от измерванията, явяващи се приблизителни данни, и тяхното представяне чрез точни двоични кодове. Това е определило сложния път за развитие на методите за контрол на информацията и представите за тях. Развитието на модела на данните показва ниска надеждност на методите с традиционно висока вероятност за откриване на грешки. Показани са начините за повишаване на надеждността на методите, основаващи се на разграничение на съществени и несъществени грешки. Предлага се развитие на сканиращия контрол за многопоточни системи на конвейери.

Ключови думи: методи за контрол на информацията, компютърна система, цифров компонент, работно диагностициране, модел на точни и приблизителни данни, надеждност на методи, сканиращ контрол.