

АВТОМАТИКА, КОМП'ЮТЕРНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.315

М. М. Аль-Дабі¹, А. В. Дрозд¹, М. О. Дрозд¹, І. Н. Николенко²

¹ Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, г. Одеса, 65044

² Одеська національна академія пищевих технологій, ул. Канатная, 112, Одеса, 65039

МЕТОДЫ РАБОЧЕГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМ КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены особенности рабочего диагностирования цифровых компонентов в системах критического применения, обеспечивающих функциональную безопасность объектов повышенного риска, включая криогенную технику. Показана целесообразность развития рабочего диагностирования для поразрядные конвейерных узлов цифровых компонентов. В рамках модели приближенных данных получили дальнейшее развитие методы контроля по неравенствам, обеспечивающие рабочее диагностирование поразрядных конвейеров. Предложены модели результата, служащие ему границами, в пределах которых результат определяется достоверным. Для трех типов поразрядных конвейерных умножителей определены модели доступа к данным в контроле.

Ключевые слова: Системы критического применения; Поразрядные конвейеры; Рабочее диагностирование; Контроль по неравенствам; Границы результата; Доступ к данным.

М. М. Аль-Дабі¹, О. В. Дрозд¹, М. О. Дрозд¹, І. М. Ніколенко²

¹ Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044

² Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039

МЕТОДИ РОБОЧОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ ЦИФРОВИХ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Розглянуто особливості робочого діагностування цифрових компонентів в системах критичного застосування, що забезпечують функціональну безпеку об'єктів підвищеного ризику, включаючи криогенну техніку. Показано доцільність розвитку робочого діагностування для порозрядних конвеєрних вузлів цифрових компонентів. В рамках моделі наближених даних отримали подальший розвиток методи контролю за нерівностями, що забезпечують робоче діагностування порозрядних конвеєрів. Запропоновано моделі результату, що служать йому границями, в межах яких результат визначається достовірним. Для трьох типів порозрядних конвеєрних помножувачів визначені моделі доступу до даних у контролі.

Ключові слова: Системи критичного застосування; Порозрядні конвеєри; Робоче діагностування; Контроль за нерівностями; Границі результату; Доступ до даних.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i1.540>

This is an open access article under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

© The Author(s) 2017.



1 ВВЕДЕНИЕ

Объекты повышенного риска, широко представленные в энергетике, включая криогенную технику, становятся естественным окружением человека. Их количественный и качественный рост, проявляющийся в повышении сложности и мощности, требует постоянного совершенствования компьютерных технологий, которые представляются в информационных управляющих системах критического применения, направленных на обеспечение функциональной безопасности объектов и собственной функциональной

безопасности [1]. Для оперативной оценки функциональной безопасности цифровых компонентов системы критического применения используются методы и средства рабочего диагностирования, контролирующие достоверность вычисляемых результатов [2].

К особенностям систем критического применения относится их проектирование для работы в двух режимах: нормальном и аварийном, а также использование отказоустойчивых схемотехнических решений. Первая особенность ограничивает множество входных слов нормального режима, а вторая особенность – структурную избыточность схем. Цифро-

вые компоненты систем критического применения строятся конвейерными. Секциями конвейеров являются одноклеточные матричные узлы, которые, наследуя описанные особенности, демонстрируют низкую контролепригодность в нормальном режиме, различную контролепригодность в нормальном и аварийном режимах и, как следствие, создают проблему скрытых неисправностей [3].

Проблема состоит в накоплении неисправностей в течение продолжительного нормального режима, не содержащего проявляющих их входных слов. В аварийном режиме цифровые компоненты работают на других входных словах, проявляющих накопленные неисправности. Это снижает отказоустойчивость цифровых компонентов, на которой основывается функциональная безопасность системы. Таким образом, функциональная безопасность систем критического применения не может быть обеспечена без решения проблемы скрытых неисправностей. Возможности рабочего диагностирования ограничиваются низкой контролепригодностью цифровых компонентов.

На практике для решения проблемы скрытых неисправностей прибегают к имитации аварийного режима при отключении аварийных защит, что неоднократно приводило к несанкционированному включению имитации с аварийными последствиями. Среди других решений наиболее эффективными являются методы, сокращающие матричный параллелизм секций конвейеров вплоть до одного операционного элемента для обработки данных по одному разряду [4]. Это преобразует современные цифровые компоненты в поразрядные конвейеры, работающие в последовательном коде. Их структуры включают регистры сканирования, которые относятся к элементам тестопригодного проектирования [5], что значительно повышает контролепригодность цифровых компонентов в нормальном режиме и выравнивает контролепригодность нормального и аварийного режима. Скрытые неисправности нормального режима остаются скрытыми и в аварийном режиме, а неисправности, проявляющиеся в аварийном режиме, проявляются и в нормальном режиме, т.е. не относятся к скрытым. При этом переход к поразрядным конвейерам также повышает соотношение производительности к сложности.

Вместе с тем, рабочее диагностирование поразрядных конвейеров до сих пор не получило должного развития, что определяет важную задачу разработки методов рабочего диагностирования цифровых компонентов при поразрядной конвейеризации вычислений.

II. КОНТРОЛЬ ПОРАЗРЯДНЫХ КОНВЕЙЕРОВ ПО НЕРАВЕНСТВАМ

Методы получают развитие в рамках определенных моделей. Для рабочего диагностирования к таким

базовым моделям следует отнести модель данных и модель объекта диагностирования.

Модели и методы развиваются от простого к реальному. Простые формы определяются изначальными точными и последовательными представлениями и возможностями человека. А реальные формы диктуются особенностями естественного мира, среди которых параллелизм и размытость получили наибольшее проявление в компьютерных технологиях, вся история развития которых свидетельствует о постоянном повышении уровня параллелизма и приближенности вычислений [6].

Модель данных получила развитие от точной формы к представлению приближенных чисел в форматах с плавающей точкой, использующих две компоненты: мантиссу и экспоненту [7]. Для точных данных рабочее диагностирование совершенствовалось в построении полностью самопроверяемых цифровых схем. Традиционными стали методы с высокой обнаруживающей способностью, среди которых наибольшее распространение для арифметических узлов получил метод контроля по числовому модулю [8]. Модель приближенных данных корректирует цель рабочего диагностирования от поиска неисправностей в процессе вычислений до оценки достоверности вычисляемых результатов и выделяет в числе старшие верные и младшие неверные разряды, в которых неисправности схем вызывают существенные и несущественные для достоверности результата ошибки [9]. Происходит переоценка традиционных методов рабочего диагностирования, которые расходуют высокую обнаруживающую способность на обнаружение наиболее частых несущественных ошибок, отбраковывая ошибочные, но достоверные результаты. Низкая вероятность существенных ошибок делает достоверность традиционных методов близкой к нулю. В рамках модели приближенных данных развиваются новые методы рабочего диагностирования, среди которых выделяется контроль по неравенствам, оценивающий величину результата и его ошибки с повышенной вероятностью обнаружения существенной ошибки по сравнению с несущественными ошибками [10].

Методы контроля по неравенствам используют модели результата, которые служат ему нижней и верхней границами. Эти методы оценивают результат, сравнивая его с границами, которые формируются на основе ограничений, накладываемых на операнды форматами данных.

Методы целесообразно рассмотреть для ключевой операции приближенных вычислений – умножения, – которая присутствует в записи чисел с плавающей точкой, и поэтому выполняется во всех операциях над мантиссами, наделяя их результаты свойствами произведения. Мантисса M нормализованного числа находится в пределах: $1 \leq M < 2$ [11]. Произведение $V = M_1 M_2$ мантисс M_1 и M_2 нормализованных сомножителей может быть представлено нижней границей

$$L_1 = \max(M_1, M_2). \quad (1)$$

Действительно, произведение P не меньше каждой из мантисс M_1 и M_2 с учетом того, что они умно-

жаются на мантиссу $M_2 \geq 1$ и $M_1 \geq 1$, соответственно. Верхняя недостижимая граница

$$H_1 = 2\min(M_1, M_2) \quad (2)$$

определяется на основании того, что половина произведения V не больше каждой из мантисс M_1 и M_2 , т.к. они умножаются на половину мантиссы $M_2/2 < 1$ и $M_1/2 < 1$, соответственно.

Пределы мантиссы нормализованного числа позволяют получить дополнительные модели результата, используя следующие неравенства:

$$(M_1 - 2)(M_2 - 2) > 0; \quad (3)$$

$$(M_1 - 1)(M_2 - 2) \leq 0; \quad (4)$$

$$(M_2 - 1)(M_1 - 2) \leq 0. \quad (5)$$

После раскрытия скобок формулы (3), (4) и (5) преобразуются соответственно к неравенствам

$$P > 2(M_1 + M_2) - 2; \quad (6)$$

$$P \leq 2M_1 + M_2 - 2; \quad (7)$$

$$P \leq 2M_2 + M_1 - 2. \quad (8)$$

Формула (6) определяет нижнюю недостижимую границу

$$L_2 = 2(M_1 + M_2) - 2; \quad (9)$$

Сравнение границ L_1 и L_2 показывает, что их разность удовлетворяет неравенству

$$-2 < L_1 - L_2 \leq 1,$$

т.е. каждая из них может ближе располагаться к результату, чем другая, определяя границу, более близкую к результату по сравнению с границами L_1 и L_2 , по следующей формуле:

$$L_3 = \max(L_1 + L_2). \quad (10)$$

Формулы (7) и (8) определяют верхнюю границу

$$H_2 = 2\min(M_1, M_2) + \max(M_1, M_2) - 2. \quad (11)$$

Сравнение границ H_1 и H_2 показывает, что

$$H_1 - H_2 = 2 - \max(M_1, M_2) > 0,$$

т.е. граница H_2 располагается ближе к результату.

Модель объекта диагностирования в условиях ее развития в направлении поразрядной конвейеризации вычислений определяет необходимость разработки моделей доступа к данным в контроле, поскольку такой доступ в поразрядных конвейерах ограничен. Модели связывают номер i разряда последовательного двоичного кода, номер j такта и номер k разряда регистра.

Можно выделить три типа поразрядных конвейерных умножителей. Для n -разрядных двоичных кодов сомножителей они содержат два n -разрядных регистра сомножителей, одну или две группы из n элементов И, вычисляющих конъюнкции разрядов сомножителей и вертикальный сумматор, складывающий конъюнкции одного веса с учетом переносов из предыдущих тактов. На выходе вертикального сумматора формируется последовательный $2n$ -разрядный код произведения [12].

В первом типе умножителя один сомножитель вдвигается в регистр сдвига, а второй – записывается

по мере поступления в разряды регистра второго сомножителя. Результат формируется с начала поступления операндов и выдается в течение $2n$ тактов.

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

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

Во втором и третьем типе умножителей используется два регистра сдвига и произведение вычисляется с $(n/2 + 1)$ -го по $(3n/2)$ -й такты соответственно по два разряда в такте и по разряду в полутакте.

Последовательный доступ к разрядам $2n$ -разрядного двоичного кода требует введения двух $2n$ -разрядных регистров произведения, сдвигающих код по два разряда $2k - 1$ и $2k$ в каждом такте, $k = 1, \dots, n$, что представляется моделью с отдельным описанием четных и нечетных разрядов кода:

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

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

Последовательный доступ к разрядам $2n$ -разрядного двоичного кода обеспечивается введением $2n$ -разрядного регистра произведения, сдвигающего код с удвоенной частотой, что описывается следующей моделью

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

Контроль по неравенствам сравнивает старшие n разрядов $2n$ -разрядного двоичного кода мантиссы произведения с n -разрядными двоичными кодами мантисс границ, формируемым по n -разрядным операндам в соответствии с формулами (1), (2), (9) – (11).

Аналитическая оценка эффективности контроля по неравенствам по определенной границе оценивается вероятностью обнаружения ошибки.

Для двухместных операций эта вероятность может быть оценена по формуле

$$P_E = 1 - \int_{M_{1L}}^{M_{1H}} F(M_1) dM_1,$$

где $F(M_1)$ – функция, описывающая диапазоны изменения операнда M_2 по операнду M_1 ;

M_{1L} и M_{1H} – пределы изменения M_1 .

Например, для границы (11) функция $F(M_1) = M_1 - 1 - E/(2 - M_1)$ определяется из условия $\Delta H_2 = H_2 - V > E$ пропуска ошибки E , а пределы $M_{1L} = (3 - Z)$ и $M_{1H} = (3 + Z)$, где $Z = \sqrt{1 - 4E}/2$, – исходя из ограничения $0 \leq \Delta H_2 < 1$, откуда следует формула с прямой зависимостью вероятности обнаружения ошибки от ее величины:

$$P_E = 1 - Z - E \ln((0,5 + Z)/(0,5 - Z)),$$

Для оценки эффективности использования в контроле тех или иных границ разработана программа на демоверсии Delphi 10 Seattle [13].

На рисунке 1 показана основная панель программы, которая для заданной разрядности $n = 8$ показывает зависимости вероятностей обнаружения

ошибки в i -м разряде произведения, $i = n + 1, \dots, 2n$, от номера разряда.

На рисунке приведена таблица, $(i - n)$ -й столбец которой содержит выраженные в процентах вероятности обнаружения ошибки в i -м разряде произведения, а строки, обозначенные как «L1», «L2», «L3», «H1» и «H2», описывают эти вероятности для границ L_1 , L_2 , L_3 , H_1 и H_2 , соответственно.

Ниже таблицы показаны диаграммы зависимости вероятности обнаружения ошибки от номера ошибочного разряда, т.е. величины ошибки.

Диаграммы демонстрируют увеличение вероятности обнаружения ошибки с ростом ее величины. Различия в диаграммах предоставляют возможности выбора границ в зависимости от их особенностей.

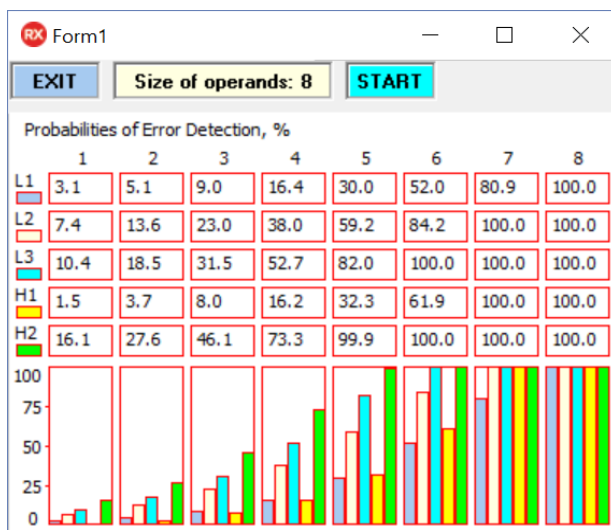


Рисунок 1 – Оценка вероятностей обнаружения ошибки результата при его контроле сравнением с границами L_1 , L_2 , L_3 , H_1 и H_2

III. ВЫВОДЫ

В системах критического применения, направленных на обеспечение функциональной безопасности объектов повышенного риска, включая криогенную технику, важное место занимает проблема скрытых неисправностей, ограничивающая отказоустойчивость цифровых компонентов в наиболее ответственном аварийном режиме работы. Решение этой проблемы с использованием поразрядной конвейеризации вычислений требует разработки соответствующих моделей и методов рабочего диагностирования, дающих оперативную оценку достоверности результатов, получаемых в системе критического применения.

В рамках модели приближенных данных для рабочего диагностирования поразрядных конвейеров выделены в качестве наиболее эффективных методы контроля результатов по неравенствам. Разработка методов осуществлена для умножителей, выполняющих над мантиссами ключевую операцию приближенных вычислений. Получены модели результата, служащие ему границами, в пределах которых результат относится к достоверным.

Для трех типов поразрядных конвейерных умножителей определены модели доступа к данным,

определяющие введение дополнительных регистров сдвига при реализации контроля по неравенствам.

Моделирование с использованием разработанной программы подтвердило эффективность контроля по неравенствам в различении существенных и несущественных ошибок, вызываемых неисправностями цифровых схем соответственно в старших верных и младших неверных разрядах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yastrebenetsky M. A.** (edit.). Safety of Nuclear Power Plants Instrumentation and Control Systems / M. A. Yastrebenetsky. – Ukraine, Kyiv: Technika, 2004. – 472 p.
2. **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.
3. **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 10th International Conference, Zhilina, Slovak Republic, 9 – 11 July 2014. – P. 137-140.
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. **Abramovici M.** Digital Systems Testing and Testable Design [Text] / M. Abramovici, M. A. Breuer, A. D. Friedman // ISBN: 9780470544389. – Wiley-IEEE Press, New York, 1990. – 652 p.
6. **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.
7. **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.
8. **Sparmann U.** On the Effectiveness of Residue Code Checking for Parallel Two's Complement Multipliers [Text] / U. Sparmann, S. M. Reddy // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 1996. – Vol. 4, No. 2. – P. 227-239.
9. **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.
10. **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.
11. 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.

12. **Drozd A.** An on-line testing method for a digit by digit pipeline multiplier with truncated calculations [Text] /A. Drozd, V. Sitnikov // East-West Design &

Test. Proceedings of the Conference. Yalta-Alushta, Ukraine, 2004. – P. 76-82.

13. Delphi 10 Seattle: Embarcadero. [Электр. ресурс]. URL: <https://www.embarcadero.com/ru/products/delphi>.

M. M. Al-Dhabi¹, O. V. Drozd¹, M. O. Drozd¹, I. M. Nikolenko²

1 Odessa National Polytechnic University, 1, Shevchenko ave., Odessa, 65044, Ukraine

2 Odessa National Academy of Food Technologies, 112, Kanatnaya str., Odessa, 65039, Ukraine

METHODS OF ON-LINE TESTING FOR DIGITAL COMPONENTS OF SAFETY-RELATED SYSTEMS

Features of working diagnosing of digital components in the information controlling systems of critical application ensuring the functional safety of objects of the increased risk including cryogenic technique are considered. Feasibility of development of working diagnosing for digit-by-digit pipeline nodes of digital components which allow to solve successfully a problem of the hidden failure reducing fail safety of digital circuits in the most responsible emergency operation of operation is shown. Within model of approximate data, control methods on inequalities gained further development for working diagnosing of digit-by-digit pipelines. Result models, employees are offered it by the lower and upper boundaries within which the result is defined by authentic. For three types of digit-by-digit pipeline multipliers models of data access in monitoring are defined. The program estimating probabilities of detection of an error depending on error amount for monitoring on inequalities with use of different boundaries of result is developed. Increase in probability of error detection in the conditions of growth of error size is shown.

Keywords: Safety-related systems; Bitwise pipelines; On-line testing; Checking by inequalities; Result boundaries; Data access

REFERENCES

1. **Yastrebenetsky M. A.** (edit.). (2004). Safety of Nuclear Power Plants Instrumentation and Control Systems. Ukraine, Kyiv: Technika, 472 p.
2. **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, 7-20.
3. **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 (DT'2014)*. – Zhilina, Slovak Republic, P. 137-140.
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. **Abramovici M., Breuer M.A., Friedman A.D.** (1990). Digital Systems Testing and Testable Design. *Wiley-IEEE Press*, New York, 652 p.
6. **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.

7. **Goldberg D.** (1991). What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic. *ACM Computer Surveys*. vol. 23, no 1, pp. 5-18.
8. **Sparmann U., Reddy S.M.** (1996). On the Effectiveness of Residue Code Checking for Parallel Two's Complement Multipliers. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. Vol. 4, No. 2, pp. 227-239.
9. **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.
10. **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.
11. 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.
12. **Drozd A., Sitnikov V.** (2004). An on-line testing method for a digit by digit pipeline multiplier with truncated calculations. *East-West Design & Test. Proceedings of the Conference*. Yalta-Alushta, Ukraine, 76-82.
13. Delphi 10 Seattle: Embarcadero. [El. source]. Access: <https://www.embarcadero.com/ru/products/delphi>.