

УДК 681.322

**В.Я. ЖИХАРЕВ, Я.В. ИЛЮШКО, В.А. КРАСНОБАЕВ***Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ЭВМ**

Рассмотрено влияние системы счисления на структурную и функциональную избыточность отказоустойчивых специализированных систем. Показано, что в позиционной системе счисления применение одного вида резервирования не всегда обуславливает наличие других видов резервирования структуры ЭВМ. Применение необходимого вида резервирования в ПСС обязательно сопровождается наличием неиспользуемой структурной избыточности, что в конечном итоге влияет на технические и стоимостные характеристики ЭВМ.

**кодирование слов, надежность ЭВМ, избыточность ЭВМ, методы резервирования, живучесть ЭВМ, отказоустойчивость ЭВМ**

**1. Постановка проблемы**

При традиционном подходе к созданию ЭВМ к системе счисления (СС), которая используется при представлении операндов А, предъявляются следующие основные требования:

- простота технической реализации представления кодовых слов при использовании существующей элементной базы;
- единственность представления кодовых слов в заданном числовом диапазоне;
- простота аппаратной и программной реализации методов и алгоритмов выполнения необходимых операций в заданной СС;
- выполнение условия «экономичности» СС, которая характеризует первичную избыточность ЭВМ.

**2. Анализ последних исследований**

В работе [1] применительно к средствам переработки информации введены частные понятия первичной и вторичной структурной избыточности ЭВМ. В общем виде данные понятия могут быть обобщены и сформулированы следующим образом.

*Определение 1.* Первичной (структурной, информационной, функциональной) избыточностью (ПИ) ЭВМ будем называть существующую или искусственно вводимую избыточность данного вида, обусловленную природой создания или методом искусственного образования применяемой СС.

*Определение 2.* Вторичной (структурной, информационной, функциональной, временной и нагрузочной) избыточностью (ВИ) ЭВМ будем называть избыточность, искусственно вводимую в ЭВМ для улучшения ее отдельных характеристик (надежности, достоверности, помехоустойчивости, отказоустойчивости и пр.) после того, как СС окончательно определена.

Из второго определения видно, что ВИ - это избыточность, обусловленная применением традиционных методов резервирования, широко используемых в технических системах различного назначения для улучшения их характеристик. Первичная избыточность для ЭВМ совпадает с понятием естественной избыточности (ЕИ) технических систем переработки информации, а ВИ - с понятием искусственной избыточности (ИИ). Необходимость введения и использования ВИ обусловлена требованиями, предъявляемыми к характеристикам создаваемых ЭВМ. Наряду с вышеперечисленными требованиями к СС отметим, что выбранная и используемая система счисления сама существенно влияет на следующие характеристики ЭВМ:

- структуру (архитектуру) ЭВМ;
- принципы переработки информации (в большей степени на методы и алгоритмы выполнения арифметических операций);
- требования, предъявляемые к использованию новой элементной базы;

- системную и пользовательскую производительность вычислительных структур;

- надежность, живучесть, достоверность и отказоустойчивость ЭВМ;

- эксплуатационные характеристики и показатели ЭВМ и пр.

Количественно объем  $V_{\text{пи}}$  оборудования ЭВМ, обусловленный наличием ПИ, несколько меньше объема  $V_{\text{еи}}$  оборудования при наличии ЕИ. Объем  $V_{\text{ви}}$  дополнительного оборудования, определенный наличием ВИ, полностью совпадает с объемом оборудования  $V_{\text{ии}}$ , обусловленным наличием ИИ. Анализ влияния СС на структуру и отдельные характеристики различных типов ЭВМ показал, что для ЭВМ вполне корректно считать, что  $V_{\text{пи}} \approx V_{\text{еи}}$ .

### 3. Цель статьи

При традиционном подходе к выбору СС ЭВМ в первую очередь необходимо обеспечить следующее условие:

$$V_{\text{пи}} = \min. \quad (1)$$

Однако выполнение условия (1) не всегда правомерно при разработке вычислительных структур, когда априорно возникает задача улучшения необходимых характеристик ЭВМ. Вполне возможно, что вариант построения ЭВМ, основанный на выполнении условия (1), вообще не целесообразен. Данная особенность ярко проявляется при использовании, например, непозиционной системы счисления в остаточных классах (СОК).

Действительно, безизбыточная ЭВМ в СОК содержит несколько большее (на  $\approx 15\%$ ) количество оборудования  $V_{\text{пи}}$ , чем ЭВМ в позиционной (например, двоичной, т.е. информация представляется позиционным двоичным кодом) СС (ПСС), при заданной одинаковой длине разрядной сетки (и при одних и тех же предъявляемых к ЭВМ требованиях) без учета введения ВИ [2, 3]. Однако, как показали теоретические исследования и практические расчеты [4, 5], для достижения заданного уровня надежности ЭВМ (вычислительных структур) в СОК требуется гораздо меньший (на 54-57% в зависимости от величины разрядной сетки ЭВМ) объем  $V_{\text{ви}}$  оборудова-

ния, чем для ЭВМ в ПСС (рис.1). Расчеты показали, что суммарная структурная избыточность  $V_{\text{си}} = V_{\text{пи}} + V_{\text{ви}}$  ЭВМ в СОК, обеспечивающая заданный уровень  $H(t)$  отказоустойчивости, значительно меньше, чем для дублированных и троированных мажоритарных вычислительных структур, широко используемых в ПСС [1], т. е. обеспечивается условие

$$\begin{cases} H_{\text{сок}}(t) \geq H_{\text{псс}}(t)[t = \text{const}]; \\ V_{\text{си-сок}} < V_{\text{си-псс}} \end{cases} \quad (2)$$

без снижения пользовательской производительности.

Выражение (3) определяет условие, обратное условию (2), т. е. при одинаковом количестве оборудования  $V_{\text{си}}$  СОК обеспечивает более высокое значение отказоустойчивости:

$$\begin{cases} H_{\text{сок}}(t) > H_{\text{пи}}(t)[t = \text{const}]; \\ V_{\text{си-сок}} \approx V_{\text{си-псс}}. \end{cases} \quad (3)$$

В табл. 1 представлены расчетные данные количества оборудования, необходимого для реализации методов повышения отказоустойчивости (надежности) в ПСС и СОК. Необходимое количество оборудования рассчитано по методике, представленной в [1], где

$V_{\text{пи}}^{(1)}$  - относительное количество оборудования безизбыточной ЭВМ для 1-байтовой разрядной сетки;

$V_{\text{си}}^{(1)}$  - относительное количество оборудования избыточной ЭВМ в ПСС (троированная мажоритарная структура) и СОК с тремя контрольными основаниями для 1-байтовой разрядной сетки;

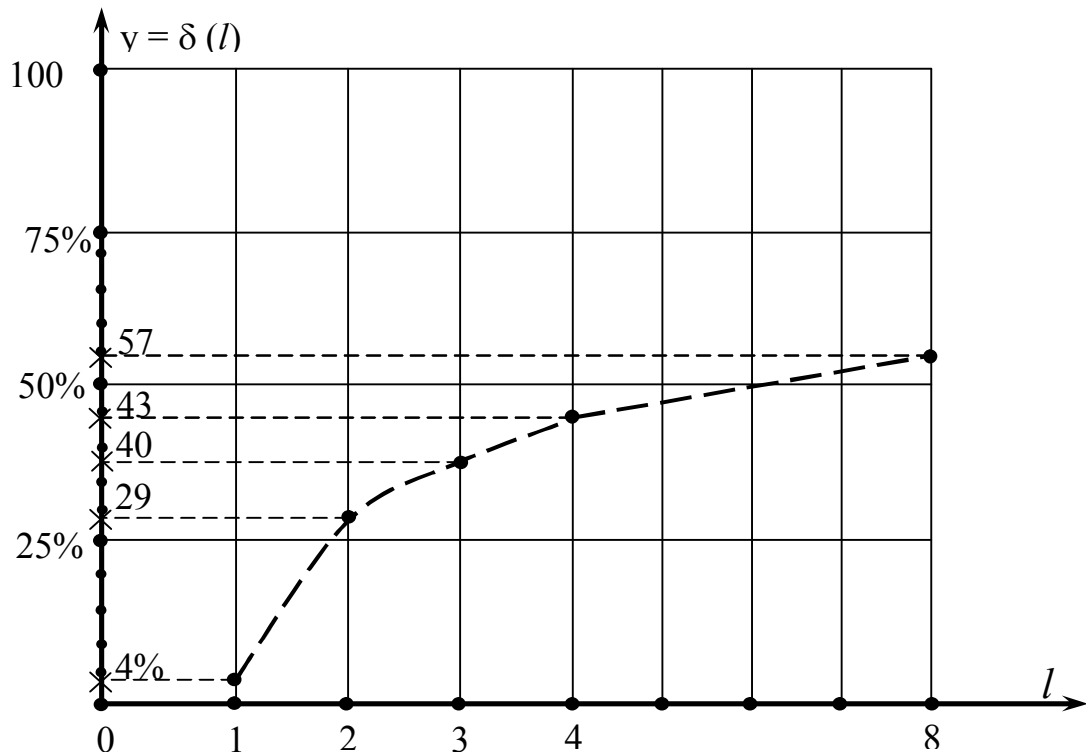
$$\delta = \frac{V_{\text{си}}^{(1)}(\text{ПСС}) - V_{\text{си}}^{(1)}(\text{СОК})}{V_{\text{си}}^{(1)}(\text{ПСС})} \cdot 100\% \quad \text{- коэффициент относительного выигрыша в количестве суммарного оборудования ЭВМ в ПСС и СОК.}$$

В соответствии с расчетами (2), (3) на рис. 1 представлена зависимость  $y = \delta(l)$ , которая показывает, что с увеличением длины 1-разрядной сетки ЭВМ, что характерно для современной тенденции развития вычислительных средств обработки цифровой информации, эффективность применения

Таблица 1

Относительное приведенное количество оборудования ЭВМ

l (n)	ПСС (двоичная)		СОК				Выигрыш в количестве оборудования $\delta$
	$V_{\text{ПИ}}^{(l)}$	$V_{\text{СИ}}^{(l)}$	Информационные основания	Контрольные основания	$V_{\text{ПИ}}^{(l)}$	$V_{\text{СИ}}^{(l)}$	
1 (4)	8	24	$m_1=3,$ $m_2=4,$ $m_3=5,$ $m_4=7$	$m_5=11,$ $m_6=13,$ $m_7=17$	10	23	4
2 (6)	16	48	$m_1=2,$ $m_2=5,$ $m_3=7,$ $m_4=9,$ $m_5=11,$ $m_6=13$	$m_7=17,$ $m_8=19,$ $m_9=23,$ $m_{10}=29,$ $m_{11}=31$	19	34	29
3 (8)	24	72	$m_1=3,$ $m_2=4,$ $m_3=5,$ $m_4=7,$ $m_5=11,$ $m_6=13,$ $m_7=17,$ $m_8=19$	$m_9=23,$ $m_{10}=29,$ $m_{11}=31,$ $m_{12}=37,$ $m_{13}=41,$ $m_{14}=43,$ $m_{15}=47,$ $m_{16}=53$	28	43	40
4 (10)	32	96	$m_1=2,$ $m_2=3,$ $m_3=5,$ $m_4=7,$ $m_5=11,$ $m_6=13,$ $m_7=17,$ $m_8=19,$ $m_9=23,$ $m_{10}=29$	$m_{11}=31,$ $m_{12}=37,$ $m_{13}=41,$ $m_{14}=43,$ $m_{15}=41,$ $m_{16}=53,$ $m_{17}=59,$ $m_{18}=61,$ $m_{19}=67$	37	54	43
8 (17)	64	192	$m_1=2,$ $m_2=3,$ $m_3=5,$ $m_4=7,$ $m_5=11,$ $m_6=13,$ $m_7=17,$ $m_8=19,$ $m_9=23,$ $m_{10}=29,$ $m_{11}=31,$ $m_{12}=37,$ $m_{13}=41,$ $m_{14}=43,$ $m_{15}=47,$ $m_{16}=51.$	$m_{17}=53,$ $m_{18}=57,$ $m_{19}=59.$	67	82	57

Рис. 1. Залежність  $y = \delta(l)$ 

СОК різко зростає.

Проявлення основних свойств СОК [2, 6, 7] пояснює зміст виражень (2) і (3) наступним чином:

- первинна надлишковість в СОК помітно і суттєво позитивно (с точки зору покращення характеристик ЕВМ) проявляє себе тільки при наявності ВІ;
- в СОК існує значуще взаємне позитивне вплив окремих видів резервування, передбачених для підвищення надійності ЕВМ.

В ПСС (в відмінності від СОК) застосування одного виду резервування не завжди обумовлює одночасне наявність інших видів резервування. Відзначимо, що це не свідчить про відсутність інших видів надлишковості. Так, застосування інформаційного резервування (введення інформаційної надлишковості) для підвищення надійності обчислень ЕВМ в ПСС викликає наявність структурної ВІ. Таким чином, застосування необхідного виду резервування в ПСС обов'язково супроводжується наявністю невикористаної

(«шкідливої») структурної надлишковості, що, в кінцевому підсумку, негативно впливає на технічні та економічні характеристики ЕВМ.

В силу впливу основних свойств (незалежність, рівноправність і малорядковість залишків  $a_i \equiv A(\text{mod } m_i), i = \overline{1, n}$ , представляючих операндів А) СОК на особливості синтезу ЕВМ структурне, інформаційне і функціональне резервування впливають одне на одне одночасно позитивне вплив. Наприклад, введення вторинної структурної надлишковості (застосування структурного резервування) за допомогою додаткового використання  $k$  резервних обчислювальних трактов до наявних  $n$  основних приводить до проявлення як інформаційного, так і функціонального резервування. Перше з них пов'язано з інформаційною надлишковістю, обумовленою наявністю надлишкових кодів слів і реалізується шляхом використання додаткової інформації, отриманої з виходів  $k$  резервних обчислювальних трактов. Відносно функціонального резервування відзначимо, що в відповідності до свойств СОК один робоспроможний ви-

числительный тракт ЭВМ в СОК, функционирующий по основанию  $m_j$  при соблюдении условия

$$m_j \geq \prod_{p=1}^2 m_{i_p}, \quad (4)$$

может взять на себя вычислительные функции до одновременно отказавших вычислительных трактов.

#### 4. Практическая реализация

На рис. 2 представлено устройство для одновременной реализации структурного, информационного и функционального резервирования в СОК [8]. Данное устройство для резервирования в СОК содержит информационные  $m_i (i = \overline{1, n})$  и контрольный  $m_{n+1}$  вычислительные тракты, блок контроля БК, дешифратор ДС, логические элементы И и ИЛИ. Присутствие сигнала на  $k$ -м выходе БК соответствует отказу  $k$ -го вычислительного тракта  $m_k (k = \overline{1, n+1})$ . Таким образом, с выхода БК на вход дешифратора поступает  $n$ -разрядный двоичный код, несущий информацию о работоспособности рабочих трактов  $m_1 - m_4$  устройства. Присутствие единиц на некоторых позициях этого кода соответствует отказу рабочих трактов с номерами, соответствующими номерам позиций этих единиц. В табл. 2 приведен пример образования выходного кода БК для СОК, заданной информационными основаниями  $m_1 = 3, m_2 = 4, m_3 = 5, m_4 = 7$  и контрольным основанием  $m_5 = 23$ .

Рассмотрим работу этого устройства.

1. Все основные тракты  $m_1 - m_4$  работоспособны. В этом случае с выхода блока контроля код 0000 поступает на вход дешифратора ДС, с выхода которого сигнал на нулевой шине через элемент ИЛИ поступает на выход «работоспособно», что свидетельствует о том, что устройство работоспособно.

2. Часть основных трактов неработоспособно.

*Допустим, что отказали тракты по основаниям  $m_1$  и  $m_2$ .* С выхода БК код 1100 поступает на вход дешифратора ДС, с выхода которого сигнал по двенадцатой ( $1100_2 = 12_{10}$ ) выходной шине через элемент ИЛИ 8 поступает на выход «работоспособно». Одновременно код 1100 открывает первый и второй элементы И (единицы на первой и второй позициях

кода 1100) и сигнал шины «Управление» через первый и второй элементы ИЛИ поступает на управляющие входы «Останов» соответственно первого  $m_1$  и второго  $m_2$  трактов устройства, а также через элемент ИЛИ поступает на управляющий вход «Пуск» контрольного тракта  $m_5$ . Таким образом, устройство работоспособно и информация обрабатывается блоками  $m_3 - m_5$  (тракты  $m_1$  и  $m_2$  отключены).

*Допустим, что отказали тракты по основанию  $m_3$  и  $m_4$ .* С выхода БК код 0011 поступает на вход дешифратора. С выхода дешифратора сигнал по третьей ( $0011_2 = 3_{10}$ ) выходной шине через элементы ИЛИ поступает на входы «Останов» трактов  $m_1 - m_5$  ( $m_3, m_4 = 35 > m_5 = 23$ ). В этом случае устройство неработоспособно и сигнал шины «Работоспособно» отсутствует.

Особенность функционирования данного устройства состоит в расширении функциональных возможностей за счет замены одним исправным контрольным трактом не одного, а одновременно нескольких неработоспособных рабочих трактов при выполнении условия (4). Это позволяет существенно повысить отказоустойчивость вычислительных структур за счет возможности одновременного использования трех видов резервирования: структурного (за счет введения контрольного вычислительного тракта по основанию  $m_n$ , параллельно функционирующего с основными вычислительными трактами), информационного (за счет использования дополнительной выходной информации контрольного вычислительного тракта, обеспечивающей возможность коррекции искаженной информации) и функционального (за счет выполнения условия (4)).

Приведенный пример показывает, что в СОК в отличие от ПСС введенная ВИ максимально полно используется для улучшения характеристик ЭВМ. Действительно, использование любого вида резервирования в конечном итоге приводит к структурной (аппаратной) избыточности, которая в СОК (в отличие от ПСС) используется для организации одновременно нескольких различных видов резервирования, что повышает коэффициент использования

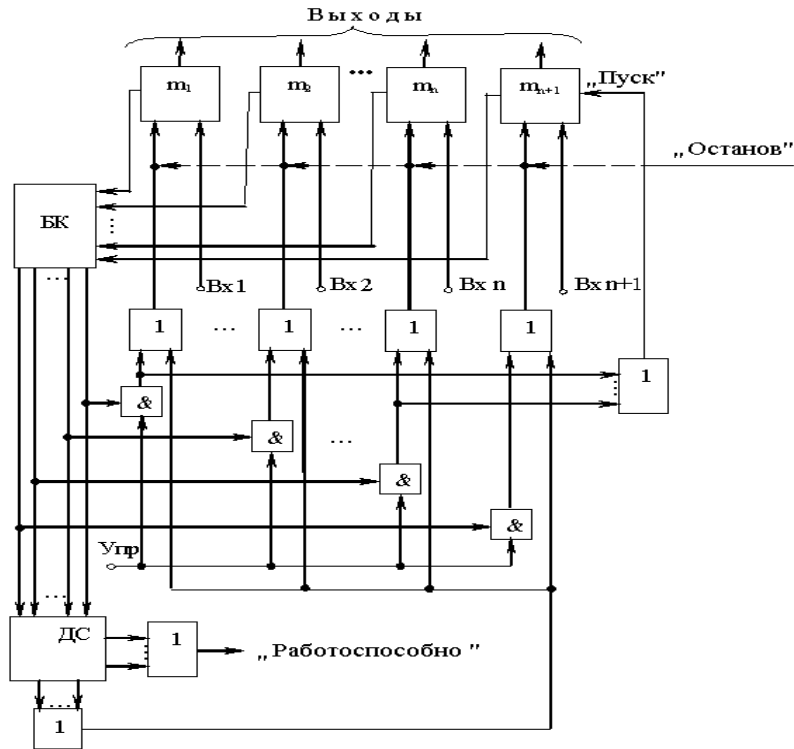


Рис. 2. Устройство для резервирования

Таблица 2

Соотношение оснований СОК

Выходной код БК				Номер отка- завшего тракта	Соотношение оснований СОК	Работо- способ- ность уст- ройства
m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	m <sub>4</sub>			
0	0	0	0	-	-	+
0	0	0	1	4	m <sub>4</sub> < m <sub>5</sub>	+
0	0	1	0	3	m <sub>3</sub> < m <sub>5</sub>	+
0	0	1	1	3,4	m <sub>3</sub> m <sub>4</sub> > m <sub>5</sub>	-
0	1	0	0	2	m <sub>2</sub> < m <sub>5</sub>	+
0	1	0	1	2,4	m <sub>2</sub> m <sub>4</sub> > m <sub>5</sub>	-
0	1	1	0	2,3	m <sub>2</sub> m <sub>3</sub> < m <sub>5</sub>	+
0	1	1	1	2,3,4	m <sub>2</sub> m <sub>3</sub> m <sub>4</sub> > m <sub>5</sub>	-
1	0	0	0	1	m <sub>1</sub> < m <sub>5</sub>	+
1	0	0	1	1,4	m <sub>1</sub> m <sub>4</sub> < m <sub>5</sub>	+
1	0	1	0	1,3	m <sub>1</sub> m <sub>3</sub> < m <sub>5</sub>	+
1	0	1	1	1,3,4	m <sub>1</sub> m <sub>3</sub> m <sub>4</sub> > m <sub>5</sub>	-
1	1	0	0	1,2	m <sub>1</sub> m <sub>2</sub> < m <sub>5</sub>	+
1	1	0	1	1,2,4	m <sub>1</sub> m <sub>2</sub> m <sub>4</sub> > m <sub>5</sub>	-
1	1	1	0	1,2,3	m <sub>1</sub> m <sub>2</sub> m <sub>3</sub> > m <sub>5</sub>	-
1	1	1	1	1-4	$\prod_{i=1}^4 m_i > m_5$	-

вводимого избыточного и общего суммарного обо- рудования ЭВМ.

Данная организация одновременно различных видов резервирования за счет введения структурной избыточности характерна для структурно-функци-

ональной организации деятельности мозга человека и может обеспечить сверхвысокую надежность, от- казостойчивость и живучесть вычислительных структур, а также большую скорость обработки ог- ромных массивов информации. В этом аспекте дея-

тельность человеческого мозга близка к голографическим принципам обработки информации, что, в свою очередь, согласуется с методами и алгоритмами переработки информации в СОК [9].

Исходя из вышеизложенного, при создании (проектировании) ЭВМ необходимо учитывать не только влияние СС на объем  $V_{\text{ш}}$ , а в первую очередь оценивать значение  $V_{\text{си}}$  (при учете влияния СС на остальные характеристики ЭВМ), т.е. целесообразно выбирать СС с учетом ее дальнейшего влияния на выбор методов улучшения необходимых характеристик ЭВМ. По-видимому, при построении высокоотказоустойчивых вычислительных структур можно отказаться от традиционного критерия «экономичности» выбора позиционных СС по критерию (1), при котором необходимо обеспечить выполнение условия  $f(q) = q \cdot \log_q N = \min$ , где  $q$  - основание данной позиционной СС;  $N$  - длина машинного слова (разрядная сетка ЭВМ). Для этого критерия оптимальное числовое значение основания СС будет равно  $q_{\text{опт}} = e \approx 2,72$ .

Как показали исследования и расчеты [1, 4, 5] выбор, с точки зрения обеспечения заданного уровня надежности ЭВМ СС целесообразно проводить по критерию

$$V_{\text{си}} = \min, \quad (5)$$

а не по критерию (1), при заданном уровне требований к отдельным характеристикам ЭВМ. Данная задача близка к задаче оптимального резервирования в теории надежности, что нашло подтверждение при практическом создании блоков и узлов отказоустойчивых ЭВМ в СОК [4].

### Выводы

Таким образом, предложенный вариант выбора СС по критерию (5) позволяет создать природоотказоустойчивые вычислительные структуры (в частности ЭВМ в СОК), что особенно важно при проектировании бортовых специализированных вычислительных комплексов баллистических ракет и космических аппаратов, а также при построении вычислителей в составе сложных и ответственных систем управления (например, для обработки информа-

ции АСУ ТП), функционирующих в реальном времени.

### Литература

1. Краснобаев В.А. Надежностная модель ЭВМ в системе остаточных классов // Электронное моделирование. -1985. -№ 4. – С. 44-46.
2. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. - М.: Машиностроение, 1968. – 440 с.
3. Торгашов В.А. Система остаточных классов и надежность ЦВМ. - М.: Машиностроение, 1973. – 118 с.
4. Ирхин В.П. Проектирование непозиционных специализированных процессоров. - Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 1999. – 136 с.
5. Краснобаев В.А. Синтез та оптимізація обчислювальних структур у системі залишкових класів // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. – № 2. – С. 36 – 37.
6. Фурман И.А., Краснобаев В.А. Новые возможности использования системы счисления в остаточных классах для построения высокоэффективных устройств обработки данных и управления // Вісник ХДТУСГ. – 2000. – Вип. 3. – С. 27 – 31.
7. Краснобаев В.А. Основы создания вычислителей на основе остаточных классов // Системы обработки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. –2001. - Вип. 1 (11). – С. 3 – 7.
8. Устройство для резервирования: А.с. 1168947 СССР / В.А. Краснобаев. – Опубл. 04.09.85, Бюл. № 27. – 4 с.
9. Краснобаев В.А., Удников А.Н. Выбор системы счисления при проектировании отказоустойчивых ЭВМ // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. – № 2. – С. 27 – 29.

*Поступила в редакцию 25.12.03*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков