



**Влияние формы кодирования операндов
на
надежность систем обработки цифровой информации**

(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенка)

В данной статье рассматривается метод повышения надежности систем обработки цифровой информации (СОИ), основанный на использовании непозиционных кодовых структур в системе остаточных классов (СОК). Проведено исследование влияния основных свойств модулярной арифметики (МА) на структуру СОИ и принцип ее функционирования. Определено, что свойства МА создают предпосылки более эффективного, чем в позиционных системах счисления, использования одновременно трех видов резервирования: структурного, информационного и функционального.

Введены и обоснованы понятия первичной и вторичной избыточности. Определено, что первичная избыточность для СОИ совпадает с понятием естественной избыточности технических систем переработки информации, а вторичная избыточность - с понятием искусственной избыточности. Данное обстоятельство дало возможность сделать следующий основной вывод: предложенный вариант выбора формы кодирования операндов в МА позволяет создать отказоустойчивые

вычислительные структуры (в частности СОИ 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 информации АСУ, функционирующих в реальном времени.

In given clause the method of increase of reliability of systems of processing of the digital information (SPI), based on use of not item code structures in system of residual classes (SRC) is considered(examined). The research of influence of the basic properties modular of arithmetics (MA) on structure SPI and principle of its functioning is carried out(spent). It is determined, that the properties MA create the preconditions more effective, than in position notations, use simultaneously of three kinds of reservation: structural, information and functional.

The concepts of primary and secondary redundancy are entered and proved. It is determined, that the primary redundancy for SPI coincides with concept of natural redundancy of technical systems of processing of the information, and secondary redundancy - with concept of artificial redundancy. The given circumstance has enabled to make the following basic conclusion: the offered variant of a choice of the form of coding of operands in MA allows to create fault tolerance computing structures (in particular SPI in SRC), that is especially important at designing the onboard specialized computer complexes of ballistic rockets and space vehicles, and also at construction of calculators in structure of complex and responsible control systems (for example, for processing the information of a management information system), functioning in real time.

Введение. При традиционном подходе к созданию систем обработки цифровой информации (СОИ) к системе счисления (СС), которая используется при кодировании (представлении) операндов, 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 СОИ.

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

Определение 1. Первичной (структурной, информационной, функциональной) избыточностью (ПИ) СОИ 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) СОИ будем называть избыточность искусственно вводимую в СОИ для улучшения ее отдельных характеристик (производительности, надежности, достоверности, помехоустойчивости, отказоустойчивости 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 СОИ 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 СОИ. Наряду с вышеперечисленными требованиями к СС отметим, что выбранная и используемая система счисления сама существенно влияет на следующие характеристики СОИ:

- структуру (архитектуру) СОИ;
- 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 СОИ;

- эксплуатационные характеристики и показатели СОИ и пр.

Количественно объем $V_{\text{пи}}$ оборудования СОИ, 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 $V_{\text{ии}}$, обусловленного наличием ИИ. Анализ влияния формы кодирования операндов на структуру и отдельные характеристики различных типов СОИ показал, что для систем обработки цифровой информации вполне корректно считать, что $V_{\text{пи}} \approx V_{\text{еи}}$.

Постановка задачи. При традиционном подходе к выбору СС СОИ в первую очередь необходимо обеспечить следующее условие:

$$V_{\text{пи}} = \min.$$

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

Действительно, безизбыточная СОИ в СОК содержит несколько большее (на $\approx 15\%$) количество оборудования $V_{\text{пи}}$, чем СОИ в позиционной (например, двоичной, т.е. информация представляется позиционным двоичным кодом) СС (ПСС) для заданной одинаковой длине разрядной сетки (и при одних и тех же требованиях, предъявляемых к СОИ) без учета введения ВИ [2, 3]. Однако, как показали теоретические исследования и практические расчеты [4, 5], для достижения заданного (необходимого) уровня надежности СОИ (вычислительных структур) в СОК требуется гораздо меньший объем $V_{\text{ви}}$ оборудования, чем для СОИ в ПСС (см. табл. 1).

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

$$\begin{cases} H_{\text{СОК}}(t) \geq H_{\text{ПСС}}(t)[t = \text{const}]; \\ V_{\text{СИ-СОК}} < V_{\text{СИ-ПСС}}, \end{cases}$$

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, т. е.

$$\begin{cases} H_{\text{СОК}}(t) > H_{\text{ПИ}}(t)[t = \text{const}]; \\ V_{\text{СИ-СОК}} \approx V_{\text{СИ-ПСС}}. \end{cases}$$

В таблице 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 СОИ в ПСС и в СОК, приведенное к одной единице 1-байтовой разрядной сетки;
- $V_{\text{СИ}}^{(1)}$ - относительное количество оборудования избыточной СОИ в ПСС (троированная мажоритарная структура) и в СОК (с тремя контрольными основаниями) приведенное к одной единице 1-байтовой разрядной сетки.

$$\delta = \frac{V_{\text{СИ}}^{(1)}(\text{ПСС}) - V_{\text{СИ}}^{(1)}(\text{СОК})}{V_{\text{СИ}}^{(1)}(\text{ПСС})} \cdot 100\% \text{ - коэффициент относительного выигрыша}$$

в количестве суммарного оборудования СОИ в ПСС и в СОК.

Результаты расчетов (см. табл. 1 и [1]) показали, что с увеличением длины 1-разрядной сетки СОИ, что характерно для современной тенденции развития вычислительных средств обработки цифровой информации, эффективность применения СОК резко возрастает.

Проявление основных свойств СОК [2, 6, 7] поясняет смысл выражений (2) и (3) следующим образом:

- первичная избыточность в СОК заметно и существенно положительно (с точки зрения улучшения характеристик СОИ) прояв-

ляет себя только при наличии ВИ;

- в СОК существует значительное взаимное положительное влияние отдельных видов резервирования, предусмотренных для повышения отказоустойчивости СОИ.

Таблица 1

l (n)	ПСС (двоичная)		СОК				Выигрыш количестве оборудова- ния, б
	$V_{\text{ПИ}}^{(1)}$	$V_{\text{СИ}}^{(1)}$	Информационные основания	Контрольные основания	$V_{\text{ПИ}}^{(1)}$	$V_{\text{СИ}}^{(1)}$	
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

В отличие от СОК в ПСС применение одного вида резервирования не всегда обуславливает одновременное наличие и других видов

резервирования. Отметим, что это не свидетельствует об отсутствии других видов избыточности. Так, применение информационного резервирования (введение информационной избыточности) для повышения достоверности вычислений СОИ в ПСС вызывает наличие структурной ВИ. Таким образом, применение необходимого вида резервирования в ПСС обязательно сопровождается наличием неиспользуемой («вредной») структурной избыточности, что, в конечном итоге, негативно влияет на технические и стоимостные характеристики СОИ.

В силу влияния основных свойств (независимость, равноправность и малоразрядность остатков $\mathbf{a}_i \circ \mathbf{A}(\text{mod } m_i), i = \overline{1, n}$, представляющих операнд А) СОК на особенности синтеза СОИ структурное, информационное и функциональное резервирование оказывают друг на друга одновременное взаимное положительное влияние. Например, введение вторичной структурной избыточности (применение структурного резервирования), посредством дополнительного использования \mathbf{k} резервных вычислительных трактов к имеющимся \mathbf{n} основным, приводит к проявлению как информационного, так и функционального резервирования. Первое из них связано с информационной избыточностью, обусловленной наличием избыточных кодовых слов и реализуемой путем использования дополнительной информации, получаемой с выходов \mathbf{k} резервных вычислительных трактов. Относительно функционального резервирования отметим, что, в соответствии со свойствами СОК, один работоспособный вычислительный тракт СОИ в СОК, функционирующий по основанию m_j (при соблюдении условия $\mathbf{m}_j \cong \bigoplus_{\rho=1}^{\mathbf{k}} \mathbf{m}_{j\rho}$ (4)),

может взять на себя вычислительные функции до \mathbf{g} одновременно отказавших вычислительных трактов.

Практическая реализация. На рис. 3.11 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 \mathbf{k} -й выходной БК соответствует отказу \mathbf{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 $m_1 \div m_n$ устройства. Присутствие единиц на некоторых позициях этого кода

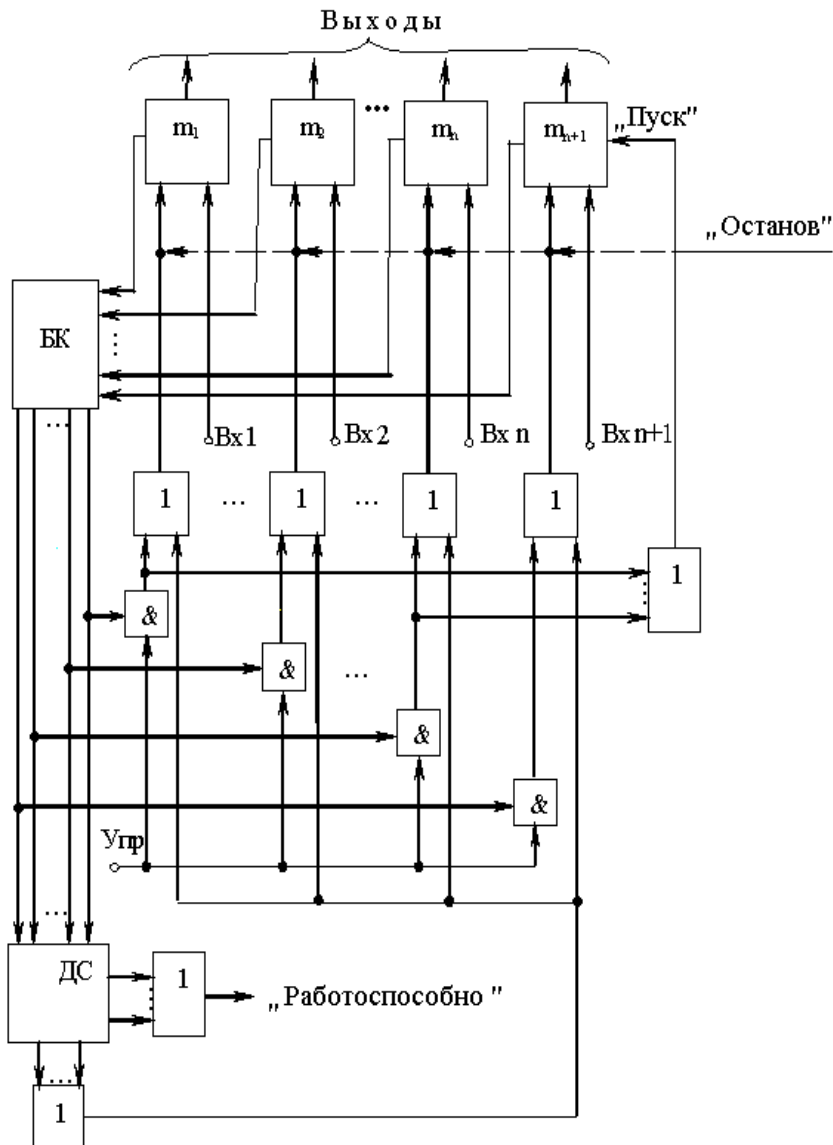


Рис.3.11 Устройство для резервирования в СОК

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 $m_5 = 23$.

Таблица 2

Выходной код БК				Номер отказавшего тракта	Соотношение оснований СОК	Работоспособность устройства
m_1	m_2	m_3	m_4			
0	0	0	0	-	-	+
0	0	0	1	4	$m_4 < m_5$	+
0	0	1	0	3	$m_3 < m_5$	+
0	0	1	1	3,4	$m_3 m_4 > m_5$	-
0	1	0	0	2	$m_2 < m_5$	+
0	1	0	1	2,4	$m_2 m_4 > m_5$	-
0	1	1	0	2,3	$m_2 m_3 < m_5$	+
0	1	1	1	2,3,4	$m_2 m_3 m_4 > m_5$	-
1	0	0	0	1	$m_1 < m_5$	+
1	0	0	1	1,4	$m_1 m_4 < m_5$	+
1	0	1	0	1,3	$m_1 m_3 < m_5$	+
1	0	1	1	1,3,4	$m_1 m_3 m_4 > m_5$	-
1	1	0	0	1,2	$m_1 m_2 < m_5$	+
1	1	0	1	1,2,4	$m_1 m_2 m_4 > m_5$	-
1	1	1	0	1,2,3	$m_1 m_2 m_3 > m_5$	-
1	1	1	1	1÷4	$\prod_{i=1}^4 m_i \neq m_5$	-

Рассмотрим работу этого устройства.

1. Все основные тракты $m_1 \div m_4$ 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.

а) 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);

б) 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 ($m_3 \cdot m_4 = 35 > m_5 = 23$). 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 надежность и 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 СОИ. 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 вводимого избыточного и общего суммарного оборудования СОИ.

Данная организация одновременно различных видов резервирования

ния за счет введения структурной избыточности характерна для структурно-функциональной организации деятельности мозга человека и может обеспечить сверхвысокую надежность, отказоустойчивость и живучесть вычислительных структур, а также большую скорость обработки огромных массивов информации. В этом аспекте деятельность 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) СОИ необходимо учитывать не только влияние СС на объем $V_{\text{пи}}$, а в первую очередь оценивать значение $V_{\text{си}}$ (при учете влияния СС на остальные характеристики СОИ), т. е. целесообразно выбирать СС с учетом ее дальнейшего влияния на выбор методов улучшения необходимых характеристик СОИ. 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 СОИ). 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, 10] выбор, с точки зрения обеспечения заданного уровня надежности СОИ, 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 СОИ в СОК [4].

Выводы. Таким образом, предложенный вариант выбора формы кодирования операндов по критерию (5) позволяет создать природоотказоустойчивые вычислительные структуры (в частности СОИ 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 информации АСУ ТП), функционирующих в реальном времени.

Литература

1. Краснобаев В.А. Надежностная модель ЭВМ в системе остаточных классов // Электрон. моделирование.-1985.-№ 4. - С 44-46.
2. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. - М.: 1968. - 440 с.
3. Торгашов В.А. Система остаточных классов и надежность ЦВМ. - М.: 1973. - 118 с.
4. Ирхин В.П. Проектирование непозиционных специализированных процессоров. - Воронеж: Воронежский государственный университет, 1999. -136с.
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 // Системи обробки інформації. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2001. - Вип. 1 (11). – С. 3 – 7.
8. А.с. 1168947 СССР. Устройство для резервирования / В.А. Краснобаев. – Оpubл. 1985. БИ. № 27.
9. Краснобаев В.А., Илюшко Я.В. Построение систем искусственного интеллекта на основе использования непозиционного кодирования информации // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ (ХАИ). – 2004. – Вып. 24. – С. 286-298.
10. Жихарев В.Я., Илюшко Я.В., Краснобаев В.А. Влияние системы счисления на надежность ЭВМ. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2004. - № 1(5).-С. 98 – 104.