

УДК 621.325.5

М.В. ЛОБАЧЕВ<sup>1</sup>, С.Г. АНТОЩУК<sup>2</sup>, А. РУСИНСКИЙ<sup>3</sup>, А.В. ДРОЗД<sup>1</sup><sup>1</sup>Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Украина<sup>2</sup>Одесский национальный политехнический университет, Украина<sup>3</sup>Университет НьюХэмпшира, НьюХэмпшир, США

## СИЛЬНОСВЯЗАННЫЕ ВЕРСИОННЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

*Определен класс сильносвязанных версионных компьютерных систем, защищенных от отказов по общей причине при экономичном распределении ресурсов между версиями. Рассмотрены вопросы организации предложенных систем и стратегии решения вычислительной задачи с параллельным и последовательным выбором верной версии. Оценена сложность сильносвязанных версионных систем и показано их преимущество в простоте по сравнению с экономичными диверсными компьютерными системами.*

**Ключевые слова:** многоверсионные компьютерные системы, сильносвязанные версионные системы, однородные структуры, сложность версионных систем.

### Введение

Одной из основных черт окружающего нас мира является его версионность, которая заключается в разнообразии форм, решающих задачу выживания. Версионность является необходимым условием для решения этой задачи в агрессивной среде, поскольку существенно повышает шансы на выживание. Определяющим свойством версии решения задачи является ее неповторимость. Заполнение экологических ниш никогда не осуществлялось клонированием.

Реализуемость более одной версии решения вычислительной задачи на одной компьютерной системе (КС) причисляет такую систему к версионным, что повышает вероятность правильного решения задачи. Версии могут реализовываться параллельно, последовательно-параллельно или последовательно во времени. Если время, отведенное на решение задачи, допускает повторный счет, то КС становится версионной, поскольку повторное решение задачи является версией, которая неповторима в силу изменчивости мира во времени и пространстве. Если интервал времени между двумя сбоями превышает время решения вычислительной задачи, то одна из версий будет реализована вне действия сбоя.

Как правило, под версией понимают средства решения задачи [1], и поэтому к версионным, а точнее к многоверсионным (МС) относят КС, которые включают в себя более одной версии средств решения задачи. Версии строятся так, чтобы избежать отказа по общей причине [2].

Очевидна значительная сложность МС, тре-

бующих многократных затрат по сравнению с одной версией. Поэтому наибольшее распространение на практике получили МС с наименьшим количеством версий, т.е. диверсные КС [3]. Однако и они требуют средств не менее чем при дублировании наиболее простой версии.

В данной работе исследуется класс сильносвязанных версионных систем (СВС), в которых можно достичь большей экономии средств. Для этого задача защиты от отказов по общей причине решается по версиям, в значительной мере связанным общей частью.

### 1. Определение СВС

Класс СВС составляется из МС с защитой от отказа по общей причине.

Пусть МС  $A$  реализует  $N$  версий  $A_1, \dots, A_i, \dots, A_N$  решения задачи,  $i = \overline{1, N}$ . Тогда для исключения отказа по общей причине должна отсутствовать общая часть всех версий, т.е. должно выполняться следующее соотношение:

$$A_1 \cap \dots \cap A_i \cap \dots \cap A_N = \emptyset \quad (1)$$

К СВС отнесем такие МС, для которых исключение средств выполнения какой-либо одной версии исключает возможности выполнения любой другой версии.

Обозначим дополнение к версии  $A_i$  как

$$\overline{A_i} = A \setminus A_i \quad (2)$$

Тогда определяющим признаком СВС является то, что дополнения к версиям не включают в себя

версий, т.е. для  $i = \overline{1, N}$  и  $j = \overline{1, N}$  выполняется  $\overline{A_i} \not\subset A_j$ .

*Утверждение 1.* Минимальное количество версий в СВС – 3.

Действительно, при двух версиях отсутствие общей части приводит к тому, что одна версия является дополнением другой, т.е. условия (1) и (2) несовместимы. Начиная с трех версий условия (1) и (2) не противоречат друг другу.

Основой для создания СВС являются КС с матричным параллелизмом, имеющие, как правило, модульную структуру с использованием множеств однотипных модулей.

Примером СВС являются КС в остаточных классах, для которых выполняется неравенство  $1 < n_d < n_o$ , где  $n_d$  и  $n_o$  – количества дополнительных и основных числовых модулей, определяющих диапазон представления данных. Такие МС имеют множество версий решения вычислительной задачи, которые используют различные наборы числовых модулей в качестве основных. В случае одного дополнительного модуля имеет место  $n_o + 1$  различных версий. Каждая из них использует свой набор из  $n_o$  числовых модулей, исключение которых из системы не позволяет решить вычислительную задачу с установленным диапазоном представления данных. Поэтому описанные МС относятся к сильносвязанным.

На схемном уровне основу для СВС составляют одноктактные устройства с матричным параллелизмом – параллельные комбинационные сумматоры и сдвигатели, матричные умножители и делители, а также блоки памяти. Такие устройства, как правило, отличаются однородностью элементов и регулярностью связей. Версии могут создаваться путем добавления дополнительных однородных элементов. При определении структуры СВС целесообразно однородные элементы объединять в укрупненные однородные элементы – секции, которые, в частности, могут состоять и из одного элемента.

*Утверждение 2.* К СВС относятся МС, у которых количество дополнительных секций меньше количества секций версии.

Действительно, дополнение к версии, состоящее из дополнительных секций, не является версией, поскольку меньше ее по количеству секций.

Пусть КС состоит из однородных элементов, разбитых на  $K$  секций  $S_1, \dots, S_k, \dots, S_K$ ,  $k = \overline{1, K}$ . Для организации СВС к КС добавляется  $L < K$  секций однородных элементов, образуя суммарно  $M = K + L$  секций  $S_1, \dots, S_m, \dots, S_M$ ,  $m = \overline{1, M}$ .

*Утверждение 3.* СВС позволяет решить вычислительную задачу при отказах не более чем в  $L$  секциях.

Действительно, исключение из вычислительного процесса любых  $L$  секций, в том числе отказавших, сохраняет в составе СВС версию из  $K$  секций, достаточную для решения вычислительной задачи.

Сильносвязанная версионная система становится защищенной от отказов при наличии двух компонент:

- множества версий, среди которых есть хотя бы одна верная, т.е. неподверженная отказам;
- средств выбора верной версии.

## 2. Стратегии решения задачи

Можно предложить две стратегии решения вычислительной задачи с использованием СВС – с параллельным и последовательным выбором верной версии.

Выбор верной версии осуществляется с участием средств контроля, которые должны оценить версию и причислить ее к верным или неверным.

Возможны два подхода к оценке версии – внутренний и внешний.

Внутренний подход заключается в контроле каждой версии встроенными в нее средствами. При этом контроль версии может быть прямым или косвенным. При прямом контроле проверяется непосредственно версия, а при косвенном – ее дополнение. Учитывая, что дополнение меньше версии, косвенный контроль может быть проще прямого. Если СВС рассчитана на защиту от одного отказа, то при выявлении косвенным контролем одного неверного дополнения вычислительная задача решается по версии, соответствующей этому дополнению. В случае выявления более одного неверного дополнения СВС не располагает верной версией решения вычислительной задачи. Если все дополнения верны, то СВС работает по текущей версии, т.е. версии, использованной на предыдущих этапах вычислений.

Внешний подход к оценке версии состоит в контроле всей СВС при ее работе на проверяемой версии. В случае обнаружения ошибок в вычисляемых СВС результатах проверяемая версия относится к неверным.

Решение вычислительной задачи с параллельным выбором верной версии реализуется путем внутреннего контроля версий. При прямом контроле включается в работу верная версия, а при косвенном контроле отключается неверное дополнение версии.

Последовательный выбор верной версии основывается на внешнем контроле версий. Если кон-

троль всей СВС фиксирует ошибку в результате вычислений, то следующий результат вычисляется на следующей версии. Смена версий выполняется до получения верной версии.

Реконфигурация СВС, обеспечивающая ее переход от одной версии решения задачи к другой, должна происходить с максимальным использованием рабочих связей, т.е. связей, задействованных при решении вычислительных задач. Это обеспечивает дополнительное упрощение СВС [4].

Полный цикл просмотра версий при последовательном выборе верной версии определяется количеством всех версий, и с учетом утверждения 1 составляет минимум 3 такта. Выбор верной версии в течение нескольких тактов может происходить без остановки или с остановкой потока входных данных, что сопровождается соответственно снижением достоверности результатов или производительности СВС. Такие потери вполне естественны в процессе «выздоровливания» СВС.

### 3. Оценка СВС

К достоинствам СВС следует отнести возможности построения наиболее простых систем, поскольку в их основе лежит совместное использование средств решения задачи различными версиями.

Количество версий, образуемых в СВС, определяется количеством сочетаний из  $M$  по  $K$  или  $L$ , т.е. по формуле  $Z = C_M^K = C_M^L$ .

Большое количество версий усложняет СВС в части выбора требуемой версии. Поэтому количество дополнительных секций целесообразно выбирать равным количеству допустимых отказавших секций.

Для наиболее вероятного случая отказа одной секции СВС имеет место  $L = 1$  и  $Z = M = K + 1$ .

В этом случае для  $i = \overline{1, N}$  и  $j = \overline{1, N}$  выполняется  $\overline{A_i} \cap \overline{A_j} = \emptyset$  и  $\overline{A_1} \cup \dots \cup \overline{A_i} \cup \dots \cup \overline{A_N} = A$ .

Пусть КС состоит из  $R$  однородных элементов.

*Утверждение 4.* Преобразование КС в СВС увеличивает количество однородных элементов в пределах от  $1 + 1/R$  до  $1,5$  раз.

Действительно, максимальное количество версий в СВС достигается при образовании секции из одного однородного элемента. В этом случае  $Z = R + 1$ , а количество секций КС увеличивается в СВС от  $K = R$  до  $M = R + 1$ , т.е. в  $1 + 1/R$  раз. При минимальном количестве версий  $Z = 3$  количество секций КС увеличивается в СВС от  $K = 2$  до  $M = 3$ , т.е. в  $1,5$  раза.

Сложность СВС можно оценить следующей суммой:

$$Q_{СВС} = Q_{ОЭ} + Q_{ВВ},$$

где  $Q_{ОЭ}$  – сложность однородных элементов СВС;

$Q_{ВВ}$  – сложность средств выбора версии.

Сложность однородных элементов СВС можно оценить их количеством, учитывая  $R$  однородных элементов в КС и  $R/K$  однородных элементов в дополнительной секции, что суммарно определяет  $Q_{ОЭ} = R + R/K$ .

Сложность средств выбора версии можно оценить, предполагая ее пропорциональность количеству версий:

$$Q_{ВВ} = (K + 1)\lambda,$$

где  $\lambda$  – коэффициент пропорциональности.

Тогда сложность СВС оценивается по следующей формуле:

$$Q_{СВС} = R + R/K + (K + 1)\lambda.$$

Минимум сложности СВС достигается при выборе  $K = \sqrt{R/\lambda}$  и составляет

$$Q_{СВС \text{ мин}} = R(1 + 1/K)^2,$$

Для диверсной системы  $Q_{ОЭ} = 2R$  и  $Q_{ВВ} = 2\lambda$ , что суммарно определяет ее сложность как

$$Q_{ДС \text{ мин}} = 2R(1 + 1/K^2).$$

Таким образом, СВС проще диверсной системы в  $\delta = Q_{ДС \text{ мин}}/Q_{СВС \text{ мин}} = 2(1 - 2K/(K + 1)^2)$  раз.

На рис. 1 показана диаграмма зависимости параметра  $\delta$  упрощения СВС от количества секций  $K$ .

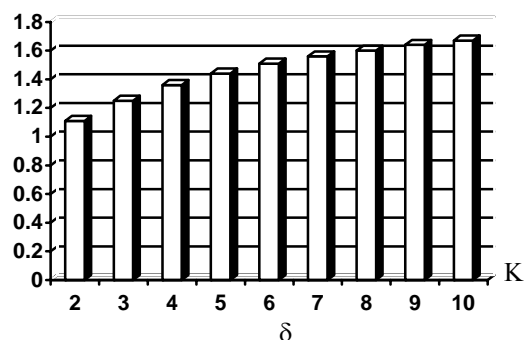


Рис. 1. Диаграмма зависимости параметра упрощения СВС от количества секций

Для минимального значения  $K = 2$  параметр  $\delta$  составляет  $1,1$ , а с увеличением  $K$  стремится к двум.

### Заключение

Предложенные СВС вписываются в тенденции развития современных КС в направлении распараллеливания вычислений с использованием однородных элементов и регулярных связей их структур.

Как правило, общая часть версий рассматривается как слабое звено в МС, а в СВС связывание версий общей частью является основным принципом их построения. Значительная общая часть версий не противоречит защите СВС от отказа по общей причине и создает условия для построения экономичных МС, которые могут быть проще диверсных.

При допустимом снижении требований к достоверности результатов и производительности СВС параллельному выбору верной версии может быть предпочтен менее затратный последовательный.

### Литература

1. Харченко В.С. Теоретические основы дефектоустойчивых цифровых систем с версионной

избыточностью / В.С. Харченко – ХВУ, 1996. – 506 с.

2. Харченко В.С. Многоверсионные системы, технологии / В.С. Харченко, В.Я. Жихарев, В.М. Илюшко, Н.В. Нечипорук. – Х.: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьковский авиационный ин-т», 2003. – 486 с.

3. Sklyar V. Multi-version FPGA-based NPP Instrumentation and Control Systems: Automata models, Implementation and operation Results / V. Sklyar, V. Kharchenko, E. Bahmach, A. Siora, V. Tokarev, V. Golovir, A. Herasimenko // Proceeding of IEEE East-West Design & Test Symposium, Yerevan, Armenia, 2007. – P. 396-400.

4. Drozd A. Iterative array multiplier with on-line repair of its functions / A. Drozd, M. Lobachev, Reza Kolahi, J. Drozd // Proceeding of IEEE East-West Design & Test Conference, Sochi, Russia, 2006. – P. 93-94.

Поступила в редакцию 3.02.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой кибернетики и вычислительной техники А.В. Скатков, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Украина.

### СИЛЬНОЗВ'ЯЗАНІ ВЕРСІЙНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ

*М.В. Лобачев, С.Г. Антощук, А. Русинський, О.В. Дрозд*

Визначено клас сильнозв'язаних версійних комп'ютерних систем, що є захищеними від відмови за загальною причиною при економічному розподілі ресурсів між версіями. Розглянуті питання організації запропонованих систем та стратегії розв'язання обчислювальної задачі з паралельним та послідовним вибором вірної версії. Оцінена складність сильнозв'язаних версійних систем та показано їхня перевага в простоті у порівнянні з економічними диверсними комп'ютерними системами.

**Ключові слова:** багатоверсійні комп'ютерні системи, сильнозв'язані версійні системи, однорідні структури, складність версійних систем.

### TIGHTLY COUPLED VERSION COMPUTER SYSTEMS

*M.V. Lobachev, S.G. Antoschuk, A. Rusinskiy, A.V. Drozd*

The class of the tightly coupled version computer systems protected from refusals for the common reason at economic distribution of resources between versions is determined. Questions of the offered systems organization and strategy of a computing task decision with a parallel and consecutive choice of the true version are considered. Complexity of the strongly connected version systems is appreciated and their advantage in simplicity is shown in comparison with economic 2-version computer systems.

**Key words:** multiversion computer systems, tightly coupled version computer systems, uniform structures, complexity of version systems.

**Лобачев Михаил Викторович** – д-р техн. наук, доцент, доцент Одесского национального университета им. Мечникова, Одесса, Украина.

**Антощук Светлана Григорьевна** - д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой информационных систем Одесского национального технического университета им. Мечникова, Одесса, Украина.

**Русинский Андрей** – канд. техн. наук, проф. кафедры электронной и компьютерной инженерии университета Нью-Хэмпшира, Нью-Хэмпшир, США.

**Дрозд Александр Валентинович** – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой системного программного обеспечения и технологий дистанционного обучения Одесского национального университета им. Мечникова, Одесса, Украина.