

© 2012 г. Н.Н. ИВАНОВ, д-р техн. наук
(Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ, ВЫПОЛНЯЮЩИХ КОМПЛЕКСЫ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ РАБОТ

Аннотация. Рассматривается методика обеспечения отказоустойчивости многопроцессорных параллельных вычислительных систем, выполняющих комплексы взаимосвязанных работ при пуассоновских потоках отказов и сбоев, основанная на применении нагруженного резерва процессорных элементов. Методика позволяет парировать двойные неисправности при выполнении двух последовательных работ в канале параллельных вычислений.

RESERVATION IN THE PARALLEL COMPUTING SYSTEMS WHICH ARE CARRYING OUT COMPLEXES OF INTERCONNECTED WORKS / N.N. Ivanov (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Profsoyuznaya 65, Moscow 117342, Russia, niknivan@ipu.ru).

Abstract. The technique of fault tolerance multiprocessor parallel computing systems, a complex of interrelated activities at the Poisson flow of failures and crashes, based on the use of private loaded standby processor elements. The technique allows to fend off a double fault when performing two successive operations in a channel of parallel computing.

1. Введение

Макропараллелизм вычислений в управляющих параллельных вычислительных системах (ВС) был декларирован в середине 90-х г.г. в работах В.В.Игнатущенко и его сподвижников и основывался на структуризации управляющих программ (программных модулей), заключающейся в их представлении в виде комплекса взаимосвязанных работ (КВР). При этом в многопроцессорных ВС становилось возможным параллельное выполнение КВР, синхронизация которого осуществлялось в соответствии со структурой КВР, представляемой либо в виде простого орграфа с одной начальной и одной конечной вершинами, либо таблицей следования задач [1-3].

По отношению к КВР изначально ставилась задача его надежного выполнения в параллельной ВС, под которым понималось выполнение КВР за время, не превышающее заданное директивное время, с заданной вероятностью. В дальнейшем задача надежного выполнения КВР получила развитие, и требование обеспечения временной надежности было дополнено требованием обеспечения аппаратной отказоустойчивости. Обеспечение этой аппаратной отказоустойчивости регламентировалось, с одной стороны, предположением о том, что *за время выполнения КВР* в ВС может произойти *не более одного* отказа

(сбоя), и, с другой стороны, применением в ВС дублирования процессоров. Подробно постановка этих задач и их решения освещены в работе [4].

Методика обеспечения надежного выполнения КВР, рассмотренная в работе [4], основана на сравнении результатов дублированных вычислений отдельных задач, образующих КВР, и при необходимости (в случае появления ошибки сравнения результатов дублированных вычислений) на проведении мероприятий по определению типа неисправности и процессорного элемента, на котором эта неисправность имела место. При этом вычислительный процесс прерывается как минимум на трех процессорах. По окончании этих процедур производится анализ хода вычислительного процесса с помощью временной составляющей методики, и на основе этого анализа принимается решение о корректировке хода вычислений с целью сокращения их времени в случае необходимости. Очевидно, что при этом происходит потеря времени, отведенного на вычисления, и, следовательно, временная и аппаратная надежность ВС становятся зависимыми.

В работах [5-6] рассматривается предложенная автором методика обеспечения аппаратной надежности выполнения КВР, свободная от указанных недостатков. В первую очередь в этих работах преследовалась цель создать предпосылки для независимости временной надежности выполнения КВР и аппаратной надежности многопроцессорной ВС, на которой выполняется данный КВР. Кроме того, ставилась цель обеспечить отказоустойчивость ВС, выполняющих *последовательность* КВР за заданное директивное время T , при возникновении *более одной* неисправности. Ресурс резервных процессоров при этом определялся исходя из надежностных параметров ВС, заданных пользователем показателей отказоустойчивости (вероятности безотказной работы на заданном временном интервале T) и числа параллельных каналов вычислений.

Предложенная в [5, 6] гибкая система резервирования процессорных элементов, которая строится на основе принципиально новой структуры вычислений, связанных с выполнением КВР, позволяет строить ВС с минимальным количеством процессорных элементов. Основное внимание в этих работах было уделено трехпроцессорной реализации каждого канала параллельных вычислений с распределенным по каналам ресурсом [5] или с общим ресурсом [6] *ненагруженных* резервных процессоров в предположении, что во время выполнения *каждой работы* может произойти не более одного отказа в процессорах одного канала.

В представляемой работе рассматривается система обеспечения отказоустойчивости ВС, структурно аналогичная системам, рассмотренным в [5, 6], но основанная на применении *нагруженного* резерва процессорных элементов. При этом оказывается возможным парировать двойные неисправности (предполагается, что потоки отказов и сбоев подчиняются закону Пуассона) при выполнении двух последовательных работ в канале параллельных вычислений, которые могут возникать с вероятностью, превышающей допустимый порог, при выполнении неравенства

$$(1) \quad m(m-1)\lambda\lambda_{сб}T^2/\mathcal{G} > 1 - P_{кан},$$

где $\mathcal{G} = T/T_{зад}$, T – директивное время выполнения последовательности КВР, $T_{зад}$ – максимальное время выполнения одной работы, $\lambda_{сб}$ и λ – интенсивности потока сбоев и потока отказов соответственно ($\lambda \ll \lambda_{сб}$), m – число нагруженных процессоров в канале, $P_{кан}$ – заданная вероятность безотказной работы канала на временном промежутке T . Поскольку отказ какого-либо канала означает отказ ВС в целом, имеет место равенство:

$$1 - P_{\text{кан}} = 1 - k\sqrt{P_{\text{BC}}} \approx \frac{1 - P_{\text{BC}}}{k}.$$

Использование описанной в работах [5, 6] методики обеспечения заданной отказоустойчивости при трехпроцессорной реализации каналов ВС с ненагруженным резервом становилось невозможным в случае, если неравенство (1) выполнялось для $m = 3$.

2. Структура вычислений при выполнении задач КВР

Рассмотрим структуру вычисления задач, предлагаемую в данной работе (рис. 1). Каждый канал состоит из $m \geq 5$ процессорных элементов, работающих в синхронном режиме (на рис. 1 показана организация вычислений в одном из каналов ВС). Каждая работа, входящая в КВР, и $m-1$ ее копий выполняются синхронно на m процессорах одним из каналов ВС, что соответствует нагруженному режиму работы резервных процессоров.

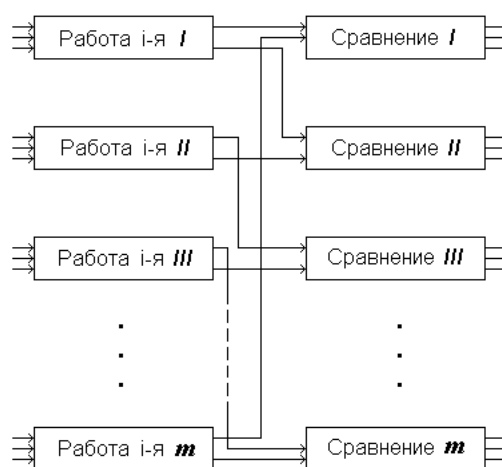


Рис.1. Структура вычислений в канале ВС

Места локализации одиночной неисправности (в одном из m процессоров) определяются соответствующими сочетаниями сигналов ошибки сравнения результатов счета на соседних процессорах. На процессор, в котором диагностирована неисправность, для выполнения задачи-последователя в случае необходимости данные поступают с одного из исправных процессоров этого канала. Выполнение задачи-последователя на всех процессорах канала позволяет в случае отсутствия неисправностей на других процессорах определить, был ли это сбой или отказ. Осложнения могут наступить, если неисправность при этом возникла еще на каком-либо процессоре. Однако при $m \geq 5$ и в этом случае будет выполняться по крайней мере одна (при $m = 5$ – одна или две) работа сравнения, которая позволит выявить хотя бы пару исправных процессоров и осуществить вычисления с исходными данными, соответствующими последующей задаче.

Заметим, что в силу соотношения $\lambda \ll \lambda_{\text{сб}}$ не учитываются двойные последовательные отказы при выполнении какой-либо работы и ее последователя, поскольку их вероятность существенно ниже вероятностей двойных неисправностей, среди которых по крайней мере один сбой. Условием правомочности такого ограничения может служить, например, выполнение неравенства $m(m-1)(\lambda T)^2 / 9 < 1 - P_{\text{кан}}$.

3. Методика выбора числа резервных процессоров

Необходимым условием применения резервирования в каналах ВС является выполнение условия $\lambda_{\text{сб}} T > 1 - P_{\text{кан}}$. Если данное условие не выполняется, то резервирование вообще не требуется и может быть принята однопроцессорная конфигурация каналов ВС.

Основное условие, выполнение которого делает целесообразным применение описываемой ниже методики, состоит в том, что неравенство $6\lambda\lambda_{\text{сб}}T^2/\vartheta > 1 - P_{\text{кан}}$ верно, т.е. применение трехпроцессорной конфигурации каналов не может обеспечить заданную отказоустойчивость, и нужно переходить к $m \geq 5$.

Исходя из того, что потоки отказов подчиняются закону Пуассона, выбор метода расчета числа процессоров основывается на аппарате обрывающихся марковских процессов (ОМП) и, в частности, на анализе «процессов гибели» [7].

По мере исключения отказавших процессоров происходит деградация канала, при которой сохраняется кольцеобразный обмен между соседними процессорами с целью сравнения результатов счета (рис. 1). Допустимый порог такой деградации, как показано выше, соответствует числу 5 исправных процессоров. Однако, если осталось лишь четыре исправных процессора и после этого не произошел отказ, выполнение последовательности КВР будет успешно завершено.

Отметим также, что даже при четырех исправных процессорах диагностирование двойных неисправностей (отказ + сбой) осуществимо с вероятностью $2/3$, что говорит о том, что при четырех процессорах канал сохраняет отказоустойчивость при условии, что $4\lambda\lambda_{\text{сб}}T^2/\vartheta < 1 - P_{\text{кан}}$. Она сохраняется частично также и при трех исправных процессорах при условии отсутствия двойных неисправностей при выполнении задачи и ее последователя. Этому благоприятствует тот факт, что вероятность двойных неисправностей становится существенно ниже при трех процессорах в канале.

Для определения m при нагруженном режиме работы процессоров будем исходить из приближенного выражения для вероятности пребывания «процесса гибели» (рис. 2) в момент времени T в поглощающем состоянии при условии $\lambda T \ll 1$ (достаточно точными будут приводимые ниже результаты при $\lambda T < 0,1$). Этому состоянию (на рис. 2 – состоянию с номером $m - 3$) предшествует состояние (с номером $m - 4$), соответствующее наличию лишь четырех исправных процессоров в канале.

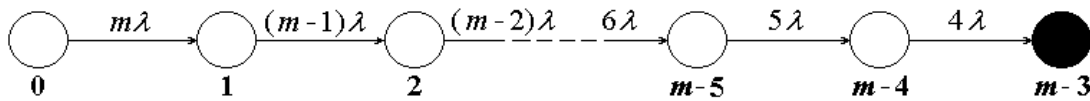


Рис. 2. Процесс гибели для нагруженного режима

Таким образом, вероятность $P(T)$ пребывания «процесса гибели» в момент времени T в состоянии, отличном от состояния $m - 3$, равна (C_n^p – биномиальный коэффициент):

$$(2) \quad P(T) \approx 1 - \frac{m! (\lambda T)^{m-3}}{3! (m-3)!} = 1 - C_m^3 (\lambda T)^{m-3}.$$

Исходя из равенства (2) и условия $P(T) > P_{\text{кан}}$ выведена система неравенств, позволяющая выбрать первоначальное наименьшее допустимое число m процессоров в канале:

$$(3) \quad \left(\frac{1 - P_{\text{кан}}}{C_{m-1}^3} \right)^{\frac{1}{m-4}} < \lambda T < \left(\frac{1 - P_{\text{кан}}}{C_m^3} \right)^{\frac{1}{m-3}}, \quad m \geq 5,$$

Выбор числа m , удовлетворяющего системе неравенств (3) обеспечивает на временном промежутке T устойчивость каждого канала ВС по отношению не менее чем к $m-4$ отказам и к произвольному числу сбоев.

Может оказаться так, что система неравенств (3) при определенных сочетаниях параметров будет несовместна. В этом случае принудительно назначается значение $m=5$.

4. Примеры

Пример 1. Заданы следующие параметры ВС: $\lambda = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ (время наработки на отказ ~ 280 ч.), $T = 10^3 \text{ с}$, $\lambda_{\text{сб}} = 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, $\mathcal{G} = 100$, $k = 3$. Требуемая вероятность безотказной работы ВС, определенная пользователем на заданном временном промежутке T выполнения КВР, составляет величину $P_{\text{ВС}} = 1 - 10^{-6}$, отсюда $P_{\text{кан}} = \sqrt[k]{P_{\text{ВС}}} = \sqrt[3]{1 - 10^{-6}} \approx 1 - 10^{-6}/3$. Произвести расчет числа резервных процессоров для нагруженного режима их работы в том случае, если резервирование процессоров потребуется.

Поскольку $\lambda_{\text{сб}} T = 10^{-2} > 1 - P_{\text{кан}}$, резервирование требуется.

Рассчитаем величину $6\lambda\lambda_{\text{сб}}T^2/\mathcal{G} = 0,6 \cdot 10^{-6} > 1 - P_{\text{кан}} = 0, (3) \cdot 10^{-6}$. Отсюда следует, что общее число процессоров в канале должно быть не меньше 5.

Рассчитаем потребное число процессоров в каждом канале ВС. Решение системы неравенств (3) приводит к необходимости выбора $m=6$. При этом в каждом канале ВС может быть парировано не менее двух отказов и произвольное число сбоев.

Пример 2. Заданы следующие параметры ВС: $\lambda_{\text{сб}} = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, $T = 10 \text{ с}$, $k = 4$, $P_{\text{ВС}} = 1 - 10^{-4}$. Поскольку $k\lambda_{\text{сб}}T = 4 \cdot 10^{-5} < 1 - P_{\text{ВС}} = 10^{-4}$, резервирование процессоров не требуется, и вероятность безотказной работы ВС будет при этом составлять величину $1 - k\lambda_{\text{сб}}T = 1 - 3 \cdot 10^{-5} > P_{\text{ВС}}$.

Пример 3. В условиях примера 1 изменим значение величин T , $\lambda_{\text{сб}}$, и \mathcal{G} , положив их равными $T = 10^2 \text{ с}$, $\lambda_{\text{сб}} = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $\mathcal{G} = 10$.

При этом $\lambda_{\text{сб}}T = 10^{-2} > 1 - P_{\text{кан}}$, $6\lambda\lambda_{\text{сб}}T^2/\mathcal{G} = 0,6 \cdot 10^{-6} > 1 - P_{\text{кан}}$. Отсюда общее число процессоров в канале должно быть не меньше 5. Однако при этих параметрах система неравенств (3) становится несовместной, и чтобы обеспечить заданную отказоустойчивость принудительно назначаем $m=5$.

5. Заключение

Основные результаты работы состоят в следующем:

1) Предложена структура каналов параллельных вычислений, позволяющая осуществлять рабочее диагностирование ВС в процессе выполнения последовательности КВР без применения диагностических тестов. При этом появляется возможность парировать неограниченное число сбоев в каналах, не прерывая процесс выполнения КВР.

2) Получены соотношения (3), которые позволяют выбрать число m процессоров канала, находящихся в нагруженном резерве, исходя из заданных величин вероятности $P_{\text{ВС}}$

безотказной работы на заданном временном промежутке T и интенсивностей отказов и сбоев, потоки которых подчиняются закону Пуассона.

3) Показано, что минимальным числом синхронно работающих процессоров в канале, при котором с вероятностью 1 парируются двойные неисправности на временном промежутке, соответствующем выполнению двух последовательных задач, является $m = 5$.

Новизна работы заключается в разработке структуры вычислений и процедуры назначения числа процессоров с нагруженным резервом в каналах управляющей параллельной ВС исходя из заданных параметров ВС и вероятности ее безотказной работы на временном промежутке выполнения последовательности КВР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ignatushchenko V.V.* A principle of dynamic control of parallel computing processes on the basis of static forecasting // Proc. of the 10-th Int. Conf. on Parallel and Distributed Computing Systems (PDCS-97). New Orleans, USA, Oct. 1997. P. 593-597.
2. *Игнатущенко В.В., Подшивалова И.Ю.* Динамическое управление параллельными вычислительными процессами на основе статического прогнозирования их выполнения // *АиТ.* 1997. № 5. С. 160-173.
3. *Игнатущенко В.В., Подшивалова И.Ю.* Динамическое управление надежным выполнением параллельных вычислительных процессов для систем реального времени // *АиТ.* 1999. № 6. С.142-157.
4. *Игнатущенко В.В., Исаева Н.А.* Резервирование взаимосвязанных программных модулей для управляющих параллельных вычислительных систем: организация, оценка отказоустойчивости, формализованное описание // *АиТ.* 2008. №10. С. 142-161.
5. *Иванов Н.Н.* Отказоустойчивость управляющих параллельных вычислительных систем, выполняющих комплексы взаимосвязанных работ // Труды 5-й международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2011). М.: ИПУ РАН. 2011. Т. II. С. 171-177.
6. *Иванов Н.Н.* Надежность параллельных вычислительных систем при выполнении комплексов взаимосвязанных работ // Труды российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ'12). М.: ИПУ РАН. 2012.— 1 электрон. опт. диск. С. 000884-000890.
7. *Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В и др.* Надежность технических систем. Справочник. Под ред. Ушакова И.А. – М. Радио и связь. 1985. – 608 с.