

© 2012 г. И.Ю. ПОДШИВАЛОВА, к.т.н., н.с.,
(Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ «КРИТИЧЕСКИХ» РАБОТ КОМПЛЕКСОВ АСИНХРОННО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ИХ НАДЕЖНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Рассматривается понятие «критических» работ при статическом прогнозировании времени выполнения комплекса взаимосвязанных работ при их асинхронном резервировании. Предлагается подход для повышения надежного выполнения комплексов взаимосвязанных работ в динамике в условиях возникновения единичной неисправности.

ON AN APPROACH TO DETERMINE “CRITICAL” TASKS OF SETS OF PROGRAM MODULES WITH THEIR ASYNCHRONOUS LAUNCHING FOR STATIC FORECASTING OF THEIR RELIABILITY REALIZATION IN THE PARALLEL COMPUTING SYSTEMS / I.Y.Podshivalova (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Profsoyuznaya 65, Moscow 117342, Russia, E-mail: irine58@yandex.ru). The definition of “critical” tasks is considered for static forecasting of time realization of complex set of tasks with their asynchronous launching. An approach to increase reliability dynamic realization of interconnected program models is offered under faults or failures of computing system resources.

1. Введение

В данной работе исследуется процесс выполнения сложных наборов задач (комплексов взаимосвязанных работ – КВР, со случайными временами их выполнения) в статике, т.е. до реализации задач в управляющих параллельных вычислительных системах (ВС). Математическое (статическое) прогнозирование времени выполнения произвольного КВР дает возможность получить стохастические оценки времени T реализации КВР (среднее значение, дисперсия, функция $F(t)$ распределения времени T), а также определить вероятность P завершения КВР за время, не превышающее заданное T_{max} , на параллельной ВС с заданной (или предполагаемой) конфигурацией и производительностью ее вычислительных ресурсов [1-3]. Стохастические оценки являются важными показателями для обеспечения надежного выполнения КВР в условиях возникновения случайной единичной неисправности (сбоя или отказа) вычислительных ресурсов ВС.

При организации процесса выполнения КВР возможно использование различных методов резервирования вычислительных процессов применительно к одному и тому же КВР, а именно синхронное, асинхронное и многоверсионное резервирование [4-5]. Каждый из данных методов резервирования обладает своими преимуществами применительно к конкретному КВР с определенной структурой и временными параметрами. Эффекты каждого из методов резервирования, а также их различных комбинаций могут быть оценены на основе принципов и методов технологии [1-3].

В работах [5-6] разрабатывались и исследовались математические модели и алгоритмические методы реализации асинхронного резервирования КВР, направленные на сокращение времени выполнения диагностических процедур и восстановления корректного вычислительного процесса в условиях сбоев/отказов ВС. Под асинхронным резервированием процессов (программных модулей) имеется в виду реализация $Z > 1$ идентичных копий каждого программного модуля КВР, причем эти копии могут выполняться на параллельных ресурсах ВС как синхронно, так и асинхронно (с запаздыванием) одна относительно другой с последующим сопоставлением результатов выполнения копий каждой работы с помощью программного модуля сравнения. Было показано, что наибольшее увеличение времени выполнения КВР происходит при неисправности, возникающей на работе-оригинале a_j .

Целью данного исследования является выявление «критических» работ КВР, возникновение неисправности на которых приводит к такому увеличению времени выполнения КВР в целом, что становится маловероятным его выполнение за заданное директивное время T_{max} . Необходимо также выяснить, какие из особенностей структуры или временных характеристик конкретного КВР становятся причиной, приводящей к такому увеличению времени выполнения КВР. Следующим шагом является поиск и исследование возможных преобразований КВР в статике, которые могут уменьшить время его выполнения.

2. Исходные данные и описание математической модели

Для решения этой задачи рассматривается исходный граф КВР, состоящий из n работ оригиналов, каждая из которых характеризуется случайным временем t_j ее выполнения (обслуживания), распределенным по экспоненциальному закону с параметром $\mu_j = 1/M[t_j]$, который соответствует интенсивности обслуживания конкретной работы a_j . К исходному графу применяется стандартная процедура преобразования к базовому КВР [1-2] с кратностью резервирования $Z=2$. Примеры таких исходного и преобразованного базового графов приведены на рис. 1, 2. Исходный граф КВР состоит из 12 вершин (рис.1), описание базового КВР задается в виде таблицы связности с заданными (пользователем) временными параметрами его работ (таблица 1). Согласно правилам перехода от исходного графа к базовому каждой работе a_j ставятся в соответствие еще две работы: работа-копия a_j' и работа сравнения b_j . Важным правилом преобразования графов является то, что работа-копия a_j' использует результаты только работ оригиналов a_j (см. таблицу 1, рис. 2).

Для блока диагностирования в таблице 1 приведен пример возникновения неисправности на работе a_5 . Отметим, что в случае возникновения отказа работа a_5 дважды выполняется в блоке диагностирования, и это помимо других работ, входящих в блок диагностирования, в том числе работ отката, число и состав которых прямо зависят от

связности данной работы-оригинала a_j . Все это должно приводить к существенному увеличению времени выполнения КВР в целом.

В качестве аналитико-имитационной модели рассматривается модель, использующая асинхронное резервирование при выполнении КВР на общем вычислительном ресурсе. Выполнение базового КВР моделируется системой массового обслуживания с числом процессоров $K=4$.

Используются следующие правила функционирования математической модели (рис.3):

Правило 1. Готовые к выполнению работы-оригиналы a_j и работы-копии a_j' выбираются из буфера Б на обслуживание в ОП по известному критерию диспетчеризации «ранг r_j соответствующей вершины графа базового КВР/связность s_j вершины». Работа-оригинал a_j имеет относительный приоритет перед работой-копией a_j' с тем же значением ранга r_j , и при наличии свободного вычислительного ресурса первой назначается на выполнение в ОП. После завершения работы номер выполненной работы передается в пул, из которого в буфер поступают готовые к выполнению работы.

Правило 2. Работа-оригинал a_j и соответствующая ей работа-копия a_j' всегда назначаются на различные ОП.

Правило 3. Работа сравнения b_j имеет абсолютный приоритет среди работ, находящихся в буфере Б (т.е. готовых к выполнению), и немедленно назначается на выполнение либо на тот ОП, на котором завершилось выполнение соответствующей работы-копии a_j' (если работа-оригинал a_j уже выполнена), либо на ОП, на котором завершилось выполнение работы-оригинала a_j (если уже выполнена работа-копия a_j').

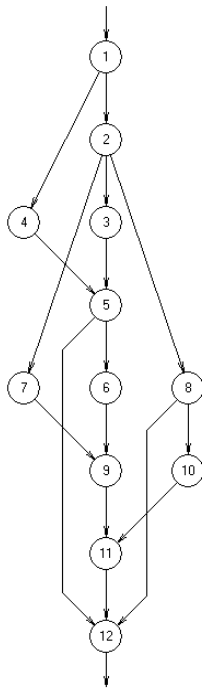


Рис. 1

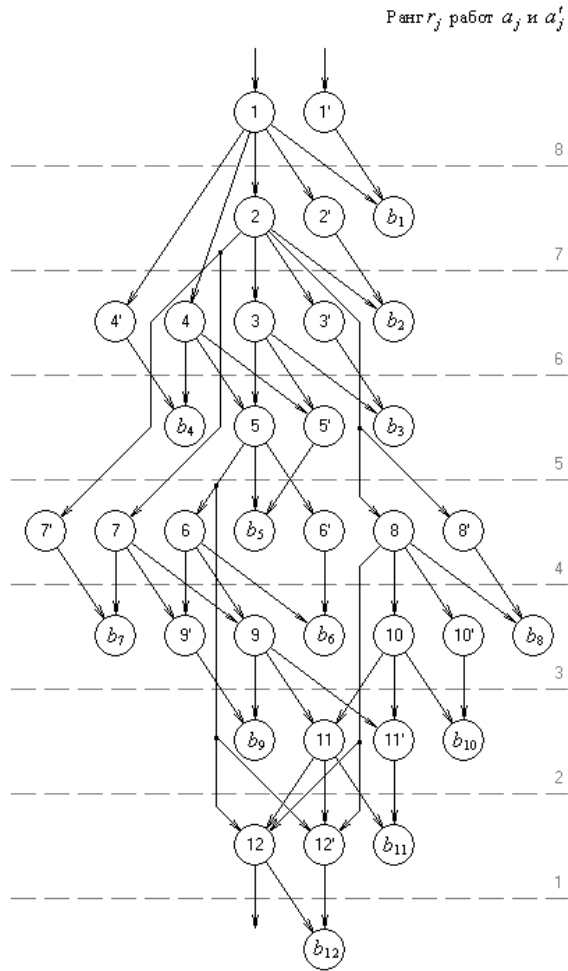


Рис. 2

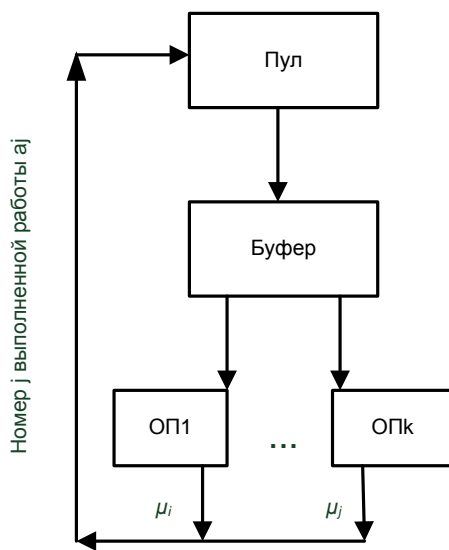


Рис. 3.

Таблица 1

Номер работы	Предшественники	Преемники	M[tj] τ	μ_j	Ранг r_j	Связность s_j
1	2	3	4	5	6	7
1	—	2, 2', 4, 4', b_1	10	0,1000	8	5
1'	—	b_1	10	0,1000	8	1
b_1	1, 1'	—	10	0,1000	абсолютный приоритет	0
2	1	3,3',7,7',8, 8', b_2	75	0,0133	7	7
2'	1	b_2	75	0,0133	7	1
b_2	2, 2'	—	10	0,1000	абс. пр-т	0
3	2	5, 5', b_3	160	0,0063	6	3
3'	2	b_3	160	0,0063	6	1
b_3	3, 3'	—	10	0,1000	абс. пр-т	0
4	1	5, 5', b_4	80	0,0125	6	3
4'	1	b_4	80	0,0125	6	1
b_4	4, 4'	—	10	0,1000	абс. пр-т	0
5	3, 4	6, 6', 12, 12', b_5	90	0,0111	5	5
5'	3, 4	b_5	90	0,0111	5	1
b_5	5, 5'	—	10	0,1000	абс. пр-т	0
6	5	9, 9', b_6	120	0,0083	4	3
6'	5	b_6	120	0,0083	4	1
b_6	6, 6'	—	10	0,1000	абс. пр-т	0
7	2	9, 9', b_7	170	0,0059	4	3
7'	2	b_7	170	0,0059	4	1
b_7	7, 7'	—	10	0,1000	абс. пр-т	0
8	2	10,10',12,12', b_8	50	0,0200	4	5
8'	2	b_8	50	0,0200	4	1
b_8	8, 8'	—	10	0,1000	абс. пр-т	0
9	6, 7	11, 11', b_9	130	0,0077	3	3
9'	6, 7	b_9	130	0,0077	3	1
b_9	9, 9'	—	10	0,1000	абс. пр-т	0
10	8	11, 11', b_{10}	150	0,0067	3	3
10'	8	b_{10}	150	0,0067	3	1
b_{10}	10, 10'	—	10	0,1000	абс. пр-т	0
11	9, 10	12, 12', b_{11}	100	0,0100	2	3
11'	9, 10	b_{11}	100	0,0100	2	1
b_{11}	11, 11'	—	10	0,1000	абс. пр-т	0
12	5, 8, 11	b_{12}	10	0,1000	1	1
12'	5, 8, 11	b_{12}	10	0,1000	1	1
b_{12}	12, 12'	—	10	0,1000	абс. пр-т	0
t_j						
5*	3, 4, b_5	c_5, d_5	70	0,0143	абс. пр-т	1
c_5	5, 5', 5*	5**, b_5^*	10	0,1000	абс. пр-т	1

5**	3, 4, c_5	d_5	90	0,0111	абс. пр-т	1
d_5	5*, 5**	работы«отката»	10	0,1000	абс. пр-т	1
b_5^*	5, 5', d_5	работы«отката»	10	0,1000	абс. пр-т	1

3. Результаты аналитико- имитационного моделирования

Результаты аналитико-имитационного моделирования подтвердили предположение, что наибольшее увеличение времени выполнения КВР происходит, когда отказ возникает на работе-оригинале a_j .

В таблице 2 в качестве примера приведены результаты моделирования, когда неисправность разного типа возникала либо при выполнении работы-оригинала a_5 , либо на ее сателитах: работе-копии a_5' или работе сравнения b_5 .

Таблица2 (время дано в условных тактах)

Штатное выполнение	Отказ на оригинале	Сбой на оригинале	Отказ на копии	Сбой на копии	Отказ на работе сравнения	Сбой на работе сравнения
1670	1873	1850	1814	1809	1799	1794

Для выявления работ-оригиналов, возникновение неисправности на которых приводит к существенному увеличению времени выполнения КВР, последовательно n раз осуществляется моделирование выполнения КВР, при этом неисправность возникает каждый раз на новой i -ой работе-оригинале $i = \overline{1, n}$. В таблице 3 приведены данные времен выполнения КВР при условии, что заданное директивное время выполнения КВР $T_{max} = 1729$ с заданной вероятностью $p = 0,99$ (определяется при штатном выполнении).

Сравнивая времена выполнения каждой из моделей, определяется группа «критических» (с точки зрения временных затрат) работ КВР, возникновение неисправности на которых значительно превышает директивное время T_{max} .

Таблица 3

Отказ на работе-оригинале a_j	Среднее время выполнения работы a_j , $M[t_j]$ (в условных тактах)	Время выполнения КВР при возникновении отказа на работе-оригинале a_j с вероятностью $p = 0,99$	Вероятность выполнения КВР за заданное директивное время $T_{max} = 1729$ при возникновении отказа на работе-оригинале a_j
1	2	3	4
1	10	1648	>0,99
2	75	1897	0,9899
3	160	2168	0,9371
4	80	1709	>0,99
5	90	1873	0,9805
6	120	1980	0,9656
7	170	2149	0,9449

8	200	2420	0,8868
9	130	2059	0,9521
10	150	2116	0,9445
11	100	1966	0,9667
12	10	1669	>0,99

Результаты аналитико-имитационного моделирования показали, что для рассматриваемой модели выполнения КВР (рис.1) при асинхронном моделировании на общем ресурсе к критическим работам можно отнести $a_2 - a_3, a_5 - a_{11}$. Обратим внимание на тот факт, что среднее время выполнения работы a_2 меньше, чем работы a_4 , но возникновение неисправности на работе a_2 приводит к большему увеличению времени выполнения КВР в целом. Это объясняется тем, что связность работы a_2 превышает связность работы a_4 (смотри по таблице 1), а следовательно, увеличивается число возможных работ отката.

Анализ результатов имитационных экспериментов выявил два наиболее важных фактора, существенно влияющих на увеличение времени выполнения КВР: 1) большая длительностью выполнения самой работы a_j , которая в случае возникновения неисправности повторно выполняется в блоке диагностирования для установления «координат» и вида неисправности; б) большое количество работ-преемников, так как в этом случае для восстановления корректного выполнения процесса возникает большее количество работ, требующих повторного выполнения (т.е. работ отката). На время выполнения КВР, разумеется, оказывает влияние и сама структура графа: так время выполнения параллельного графа менее подвержено изменению по сравнению со временем выполнения сильносвязного графа.

После выявления факторов, оказывающих существенное влияние на время выполнения КВР в условиях единичной неисправности, предлагается, не изменяя первоначальные информационные и логические связи исходного КВР, вносить дополнительные изменения в структуру КВР, связанные с алгоритмами выполнения «критических» работ КВР: разделение алгоритма выполнения «критической» работы на несколько последовательно-параллельных алгоритмов с возможным разделением преемников для каждого из них. Это приведет к добавлению новых работ в исходный КВР с меньшими временами выполнения по сравнению с «критической» работой, а также уменьшению числа работ-преемников. Имитационные эксперименты подтверждают эффективность предложенного подхода снижением времени T реализации КВР до 15% от первоначального.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Елисеев В.В., Игнатущенко В.В.* Проблема надежного выполнения сложных наборов задач в управляющих параллельных вычислительных системах // Проблемы управления. 2006. № 6. С. 6–18.
2. *Елисеев В.В., Игнатущенко В.В., Подшивалова И.Ю.* Оценка отказоустойчивости управляющих параллельных вычислительных систем: новый подход // Автоматика и телемеханика. 2007. № 6. С. 166–185.
3. *Игнатущенко В.В., Исаева Н.А.* Резервирование взаимосвязанных программных модулей для управляющих параллельных вычислительных систем: организация, оценка отказоустойчивости, формализованное описание // Автоматика и телемеханика. 2008. № 10. С. 142–161.

4. *Игнатущенко В.В., Милков М.Л., Сидоров А.В.* Многоверсионное резервирование взаимозависимых параллельных задач для управляющих параллельных вычислительных систем: формализованное описание, оценка отказоустойчивости // Надежность. 2009. №4. С. 44–61.
5. *Подшивалова И.Ю.* Оценка различных методов асинхронного резервирования взаимозависимых параллельных задач для управляющих параллельных вычислительных систем / Труды пятой международной конференции «Параллельные вычисления и задачи управления» (РАСО'2010). М.: Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2010. С. 981–988.
6. *Подшивалова И.Ю.* Разработка моделей надежного выполнения взаимозависимых программных модулей с использованием различных методов резервирования // Труды пятой международной конференции "Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2011)" (3-5 октября 2011 г., Москва, Россия). Том II. М.: Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2011. С. 295–303.