

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ РЕЗЕРВИРОВАННЫМИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫМИ ЗАДАЧАМИ СО СЛУЧАЙНЫМИ ВРЕМЕНАМИ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ В УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ¹

В.В. Игнатущенко

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65

Н.А. Исаева

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65

E-mail: nat_i@ipu.rssi.ru

На основе современного математического аппарата обрывающихся Марковских процессов и теории массового обслуживания, впервые сформулирована и исследуется проблема интеллектуального динамического управления резервированными взаимосвязанными задачами со случайными временами их выполнения в управляющих параллельных вычислительных системах в режиме реального времени на основе математического прогнозирования времен их выполнения в управляющих параллельных вычислительных системах в условиях сбоев или отказов их вычислительных ресурсов.

INTELLIGENT DYNAMIC CONTROL OF INTERACTING PARALLEL REDUNDANTIZATIONS OF TASKS HAVING RANDOM TIMES OF REALIZATION IN THE PARALLEL CONTROL COMPUTING SYSTEMS / V.V. Ignatushchenko, N.A. Isayeva (Institute of Control Sciences RAS, Profsoyuznaya St., 65, Moscow, 117997, Russia). The problem of intelligent dynamic control of reliable real-time execution of interacting parallel reduntizations of complex sets of tasks having random times of realization in the parallel control computing systems - using mathematical forecasting of their times of execution in the parallel control computing systems under faults or failures of their resources for the first time was formulated and investigated on the basis of terminating Markov processes and the queuing theory.

¹ Работа частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-08-00372-а)

1. Введение в проблему

Излагаемое исследование является составной частью разработки новой компьютерной технологии [1 – 4], создаваемой в ИПУ РАН и направленной на обеспечение надежного выполнения сложных наборов взаимосвязанных задач, со *случайными* временами их выполнения, в параллельных управляющих вычислительных системах (ВС), функционирующих в контурах управления реального времени, в частности - в условиях сбоев или отказов их вычислительных ресурсов.

Под *надежным выполнением* конкретного набора задач, задаваемого пользователем, в управляющей параллельной ВС понимается выполнение задач набора за время, не превышающее заданное (пользователем) директивное время T_{max} с требуемой (удовлетворяющей пользователя) вероятностью P [1 – 4]. *Наборы задач* (процессов, заданий, а в общем случае – *программных модулей*) рассматриваются в наиболее трудоемких версиях – с произвольными информационными и логическими связями между задачами и/или их фрагментами, и потому названы в [1 – 4] *комплексами взаимосвязанных работ* (КВР) – комплексами взаимозависимых параллельно-последовательных программных модулей со *случайными* временами их выполнения. В качестве управляющих параллельных ВС рассматриваются многопроцессорные ВС со многими потоками команд и данных (класс МКМД, включая мультимикропроцессорные ВС с распределенной структурой), которые предназначены для использования в сложных контурах управления реального времени, – например, для управления сложными объектами типа ядерных реакторов, управления полетами летательных аппаратов, включая космические, для управления разветвленными быстропротекающими физическими и химическими технологическими процессами и пр.

В понятии надежного выполнения задач, *отказ* управляющей ВС трактуется не только как потеря ее работоспособности, но и как НЕвыполнение требуемого КВР за директивное время T_{max} . *Такой отказ может иметь место даже при безукоризненном, безотказном функционировании аппаратуры и программного обеспечения ВС*. Среди возможных причин такого отказа – внезапные изменения параметров объекта управления из-за случайных изменений условий его функционирования или анормальных изменений параметров окружающей среды, случайные изменения объемов данных и объемов вычислений по программам задач (в частности – вследствие логических ветвлений в программных модулях и между модулями), задержки выполнения приложений вследствие некоторых типов прерываний, конфликты на общих ресурсах параллельных ВС, и пр. И разумеется, время выполнения КВР может существенно увеличиваться и превышать заданное директивное время из-за внезапных физических неисправностей – сбоев или отказов ресурсов ВС.

Отметим также следующее важное обстоятельство: в современные системы управления сложными объектами и процессами на основе ВС обычно включаются задачи *оптимизации*, имеющие, как правило, поисковый и/или итерационный характер, с заранее непредсказуемым числом шагов или итераций.

Вследствие случайного характера указанных выше явлений, эффектов и событий, времена выполнения отдельных задач и их фрагментов, а также КВР в целом рассматриваются в общем случае как *случайные* величины, а процесс выполнения КВР в *параллельных* управляющих ВС (на которые ориентировано данное исследование) – как *случайный процесс*.

Применительно к управляющим *параллельным* ВС проблема исследования возможности надежного выполнения заданного пользователем КВР за директивное время T_{max} получила название *математического прогнозирования* времени выполнения задач ([1 - 4] и другие работы этого же направления). Формально под математическим (статическим) прогнозированием времени выполнения конкретного, заданного пользователем КВР понимается определение в статике (т.е. до реализации задач в ВС) вероятностных оценок времени T реализации КВР (среднего значения, а главное – функции $F(t)$ распределения времени T) и определение вероятности P завершения КВР за время, не превышающее заданное T_{max} , на параллельной ВС с заданной (или предполагаемой) конфигурацией и производительностью ее вычислительных ресурсов – процессоров ВС [1 - 4].

В настоящее время упомянутая технология, базирующаяся на аппарате обрывающихся марковских процессов, матстатистики и теории массового обслуживания, развивается, в частности, в направлении разработки и исследований различных методов и средств *резервирования программных модулей* КВР (включая адаптивное – перенастраиваемое в динамике по реальным событиям в системе – резервирование вычислительных процессов), а

также в направлении оценивания отказоустойчивости управляющих параллельных ВС при выполнении *каждого конкретного КВР* для последующего интеллектуального динамического управления взаимосвязанными, параллельно-последовательными вычислительными процессами непосредственно в ходе выполнения наборов задач в управляющей ВС [4, 5, 6].

Разработаны основные правила и практические рекомендации по реализации различных версий:

- синхронного резервирования (СР) программных модулей КВР [7 - 9], которое соответствует структурной избыточности вычислителей, берущей свое начало еще от первых многомашинных комплексов и многопроцессорных ВС;

- асинхронного резервирования (АС) программных модулей [5,10], – реализации нескольких идентичных копий каждой работы КВР, причем эти копии могут выполняться на параллельных ресурсах ВС как синхронно, так и асинхронно (с запаздыванием) одна относительно другой, с последующим сравнением результатов выполнения копий каждой работы программными же средствами (как и при синхронном резервировании);

- одного из вариантов многоверсионного резервирования (МР) программных модулей [11 -12], при котором сохраняется структура КВР в целом, но используются различные алгоритмы выполнения каждой работы КВР (например более быстрые, но менее точные).

Принципиально важно, что для всех рассмотренных (в рамках нашего подхода) версиях резервирования программных модулей справедливы унифицированные формальные правила и процедуры программного диагностирования одиночных ошибок при выполнении любой работы (программного модуля) реализуемого КВР на любом из процессоров ВС – определения «координаты» *одиночной* неисправности (номера неисправного процессора) и ее типа (сбой или отказ) [13 - 15].

В настоящее время многочисленными результатами аналитико-имитационного моделирования разнообразных КВР показано, что для каждого конкретного КВР невозможно *априори* предсказать целесообразность и эффективность использования того или иного метода резервирования (СР, АР или МР) его программных модулей и тем более – при случайных временах их выполнения, ибо эффекты каждого из методов и их различных комбинаций (по затратам машинных и временных ресурсов на выполнение КВР) зависят от конкретной структуры заданного КВР, временных параметров его работ и соотношений этих параметров, от конфигурации вычислительных ресурсов ВС и пр.

В целом, разрабатывается новый подход к оценке и обеспечению отказоустойчивости управляющих параллельных ВС при выполнении сложных комплексов взаимосвязанных работ (программных модулей) – КВР, со *случайными* временами их реализации: на основе формализованных описаний и математических моделей вычислительных процессов аналитически определяются *вероятности успешного завершения* каждого конкретного КВР за заданное (пользователем) директивное время (или, наоборот, отказа в его выполнении) при программной избыточности вычислительных процессов, т.е. при резервировании программных модулей КВР – синхронном, асинхронном, многоверсионном и адаптивном [16]. Эти оценки определяются как для нормального, штатного выполнения КВР с резервированными программными модулями (базового КВР), так и для случаев *одиночной* неисправности (ошибки) – сбоя или отказа – одного (любого) из процессоров ВС при реализации им *любой* из работ базового КВР, с оценкой влияния каждой ошибки на время выполнения КВР.

Фактически, на основе современного математического аппарата обрывающихся марковских процессов, матстатистики и теории массового обслуживания *впервые* сформулирована и исследуется проблема разработки нетрадиционных принципов и методов резервирования взаимосвязанных параллельных вычислительных процессов как инструмента для реализации принципиально нового – интеллектуального подхода к обеспечению надежного выполнения сложных наборов задач (комплексов взаимосвязанных

программных модулей со случайными временами их реализации) в управляющих параллельных вычислительных системах (ВС).

2. Обобщенная блок-схема технологии интеллектуального динамического управления резервированными программными КВР

Концепция рассматриваемой технологии [17,18], обеспечивающая решение сформулированной проблемы может быть представлена совокупностью следующих математических моделей и методов и соответствующих им функциональных блоков, представленных на рис. 1.

Блок I. Графовые модели КВР: исходного КВР; базового КВР (с резервированием работ исходного КВР и процедурами сравнения их результатов), который соответствует нормальному, штатному (т.е. в отсутствие ошибок) выполнению исходного КВР при различных методах резервирования его программных модулей, а именно – при синхронном (СР) [7 - 9], асинхронном (АР) [5, 10] и многоверсионном (МР) резервирования работ КВР [11-12]; преобразованных КВР (в каждом из которых предусматривается ошибка при выполнении одной из работ базового КВР), формируемых по формальным правилам, – с включением работ программного блока диагностирования (БД) [14]; последний унифицирован для различных методов резервирования работ КВР (разумеется, возможны варианты структур БД, отражающих специфику конкретного метода резервирования).

Граф каждого из указанных КВР описывается таблицей связности его вершин с известной структурой. Описание каждого из КВР в виде таблицы связности с заданными (пользователем) средними временами его работ является исходной информацией для математических моделей *блока II*.

Блок II. Соответствует базовой математической модели (для исходного КВР) и ее модификациям – для базового КВР и для преобразованных КВР с различными методами резервирования программных модулей. Базовая и модифицированные математические модели имеют одинаковую структуру, представляемую в виде системы массового обслуживания (СМО), но модифицированные модели характеризуется расширенным (по сравнению с базовой моделью) набором параметров и описанием состояний процессов, а для различных методов резервирования – и правилами функционирования математических моделей (отражающими специфические различия между СР, АР и МР).

Функционирование каждой из моделей описывается обрывающимся марковским процессом (ОМП). Для каждого из упоминавшихся КВР формируется граф переходов состояний ОМП и соответствующая ему матрица интенсивностей переходов; эти данные являются исходной информацией для восстановления соответствующих функций $F(t)$ распределения времени T выполнения всех упомянутых КВР (*блок III*).

Блок III. Расчет функций $F(t)$ осуществляется по оригинальным математическим методам и(или) специальным программным моделям, разработанным в ИПУ РАН [19]. По функции $F(t)$ определяется, с одной стороны, вероятность завершения соответствующего КВР за время, не превышающее заданное директивное время T_{max} , на параллельной ВС с заданной конфигурацией ее вычислительных ресурсов, а с другой стороны – определяется вероятность отказа ВС в оговоренном ранее смысле при выполнении каждого из упоминавшихся КВР – исходного, базового и преобразованных КВР. Результаты вычислений функции $F(t)$ заносятся в Таблицу Прогнозов (*блок IV*).

Блок IV. В Таблицу Прогнозов, в частности, заносятся: прогнозы времен штатного выполнения базового КВР и его фрагментов – наступления контрольных событий Z_j (завершения контрольной работы j или ее фрагмента на процессоре ВС); «критические точки» $T_{cr}(j)$ (наиболее поздние из допустимых моментов наступления контрольных событий Z_j) выполнения фрагментов КВР с различными методами резервирования работ КВР с учетом работ программного блока диагностирования (БД) для событий сбоя или отказа на любой работе КВР; «критические точки» дообслуживания КВР (выполнения тестовых фрагментов КВР) при использовании различных алгоритмов управления (штатная

реализация исходного и базового КВР, реализация упрощенных версий работ, выполнение только «критических процессов», и пр.).

Использование статического прогнозирования для динамического управления вычислительными процессами основано на сравнении реальных физических моментов t_j наступления контрольных событий Z_j со значениями соответствующих «критических точек» $Tcr(j)$, содержащихся в Таблице Прогнозов, и на целенаправленном манипулировании (в случае $t_j > Tcr(j)$) упомянутыми алгоритмами управления и методами резервирования процессов для обеспечения надежного выполнения каждого конкретного КВР.



Рис. 1.

Принципиально важно, что технология обеспечивает анализ, оценку и выбор различных методов резервирования и планирования (диспетчеризации) работ для каждого конкретного КВР; доказано, что для одного и того же КВР могут оказаться рациональными различные дисциплины резервирования и диспетчеризации работ – в зависимости от структуры КВР и конкретных значений временных параметров его работ.

Рассматриваемое динамическое управление надежным выполнением КВР – с резервированием его программных модулей, при штатном функционировании параллельной ВС и в условиях сбоев/отказов ее вычислительных ресурсов – названо *интеллектуальным*, поскольку алгоритм управления процессами в момент t_j наступления каждого контрольного события Z_j должен подтверждаться или оперативно переназначаться (в режиме реального времени) на основе *статических* прогнозов (перманентно уточняемых в динамике) по разрабатываемому составному критерию, включающему или учитывающему следующие основные параметры и факторы: имеющаяся (в текущий момент) конфигурация и загруженность вычислительных ресурсов ВС и текущее состояние выполняемого КВР; заданный набор алгоритмов управления процессами и ресурсами (решающих правил), изменения приоритетов процессов (например, определение условий, при которых процессы полагаются или становятся «критическими»); имеющийся набор программных версий

процессов (включая резервные версии); текущий и альтернативные *методы резервирования программных модулей*; внезапные ошибки процессоров ВС в текущем сеансе выполнения КВР; допустимое время дообслуживания КВР, вероятность (или ее оценка) завершения процесса дообслуживания КВР за заданное T_{max} ; заданная или ожидаемая длительность работ, необходимых для успешного завершения КВР, включая программные процедуры диагностирования ошибок и восстановления вычислительного процесса.

3. Обобщение и заключение

В целом, разрабатывается принципиально новый подход к *интеллектуальному динамическому управлению* параллельными вычислительными процессами при выполнении сложных наборов взаимосвязанных задач (со случайными временами их реализации) в режиме реального времени.

Новая и важная особенность подхода [5, 17,18] к резервированию взаимосвязанных программных модулей заключается в том, что здесь *не задаются и не используются* традиционные технические параметры надежности компонентов ВС, а потенциальная возможность внезапной одиночной неисправности какого-либо из процессоров ВС при выполнении какого-либо из программных модулей КВР, ее влияние на время выполнения базового КВР учитывается и определяется на основе нетрадиционных принципов, развитых в [5] (для асинхронного резервирования) и обобщенных в [17] для различных методов резервирования взаимосвязанных программных модулей.

Другим важным результатом предлагаемого подхода представляется новое решение одной из извечных задач обеспечения отказоустойчивости – исключение необходимости использования «сторожа над сторожем» (применительно к резервированию взаимосвязанных программных модулей КВР): в качестве работы, при выполнении которой предполагается («предусматривается») и парируется ошибка (искажение данных), рассматривается каждая из работ КВР с резервированием его программных модулей, включая работу сравнения («сторожа» над копиями одноименных работ КВР).

Изложенная совокупность этапов и процедур для обеспечения надежного выполнения КВР и их последовательность остаются неизменными для самых разнообразных КВР, задаваемых пользователем, и различных классов параллельных вычислительных систем;

Технология обеспечивает анализ, оценку и выбор различных методов и способов резервирования работ (программных модулей) КВР, планирования (диспетчеризации) работ для каждого конкретного КВР; здесь уместно упомянуть, что для одного и того же КВР могут оказаться рациональными различные дисциплины диспетчеризации – в зависимости от конкретных значений временных параметров работ КВР.

Помимо интеллектуального динамического управления надежным выполнением КВР, развитие нашей технологии направлено на достижение следующих научных и практических целей и эффектов:

- априорная оценка «пригодности» управляющей параллельной ВС для выполнения конкретного набора задач управления и функций, задаваемых пользователем, за заданное время T_{max} с требуемой вероятностью P , – даже на ранних этапах проектирования программно-аппаратурных комплексов;

- выбор такой конфигурации вычислительных ресурсов параллельной ВС, которая является достаточной для надежного выполнения требуемого набора задач управления;

- адаптивное – перенастраиваемое в динамике по реальным событиям в системе – резервирование вычислительных процессов (программных модулей).

В изложенной комплексной математической и технической постановке рассматриваемая проблема (и технология) целенаправленного манипулирования избыточностью программных модулей как инструмента и средства для управления надежным выполнением КВР (со случайными временами выполнения задач), – такая проблема для управляющих параллельных ВС ставится и решается впервые. Принципиально важно, что здесь как для оценки отказоустойчивости ВС при реализации самых разнообразных наборов задач, так и

для управления их надежным выполнением не задаются и не используются традиционные технические параметры надежности вычислительных ресурсов ВС, с их зачастую гипотетическими или весьма спорными значениями. Примеры аналогичных технологий авторам доклада неизвестны.

Литература

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 // Автоматика и телемеханика. 1997. № 5. С. 160-173.
3. Игнатущенко В.В., Подшивалова И.Ю. Динамическое управление надежным выполнением параллельных вычислительных процессов для систем реального времени // Автоматика и телемеханика. 1999. № 6. С.142-157.
4. Игнатущенко В.В., Елисеев В.В. Проблема надежного выполнения сложных наборов задач в управляющих параллельных вычислительных системах // Проблемы управления. 2006. № 6. С. 6-18.
5. Игнатущенко В.В., Подшивалова И.Ю., Елисеев В.В. Оценка отказоустойчивости управляющих параллельных вычислительных систем: новый подход // Автоматика и телемеханика. 2007. № 6. С. 166-185.
6. Игнатущенко В.В. Обеспечение надежного выполнения сложных наборов задач на основе интеллектуального управления параллельными взаимодействующими процессами // Труды XXXVI Междунар. Конф. "Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе" (IT+SE'09). Украина, Ялта-Гурзуф, Май 2009. С. 50-52.
7. Трубкин Д.В., Шастун В.В. Синхронное резервирование взаимосвязанных программных модулей в параллельных вычислительных системах: новый подход // Труды XXXIV Междунар. Конф. «Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе» (IT+SE'07). Май 2007. Украина. Ялта-Гурзуф. С. 63–66.
8. Королев С.С. Новые математические модели синхронного резервирования взаимосвязанных программных модулей в параллельных ВС // Труды XXXV Междунар. Конф. «Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе» (IT+SE'08). Май 2008. Украина. Ялта-Гурзуф. С. 69-72.
9. Исаева Н.А., Королев С.С. Синхронное резервирование взаимозависимых параллельных задач для управляющих параллельных вычислительных систем: формализованное описание, оценка отказоустойчивости // Надежность. 2009. № 1. С. 3-26.
10. Подшивалова И.Ю. Асинхронное резервирование комплексов взаимосвязанных программных модулей при их выполнении на отдельных вычислительных ресурсах // Труды XXXV Междунар. Конф. «Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе» (IT+SE'08). Май 2008. Украина. Ялта-Гурзуф. С.
11. Милков М.Л., Сидоров А.В. Математические модели многоверсионного резервирования комплексов взаимосвязанных программных модулей в параллельных вычислительных системах // Труды XXXV Междунар. Конф. «Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе» (IT+SE'08). Май 2008. Украина. Ялта-Гурзуф. С. 80-83.
12. Игнатущенко В.В., Милков М.Л., Сидоров А.В. Многоверсионное резервирование взаимосвязанных управляющих параллельных вычислительных систем: формализованное описание, оценка отказоустойчивости // Надежность. 2009. № 4. С. 44-61.
13. Исаева Н.А. Формализованное описание резервирования взаимосвязанных программных модулей в параллельных вычислительных системах // Труды XXXIV Междунар. Конф. «Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе» (IT+SE'07). Украина. Ялта-Гурзуф. Май 2007. С. 56–60.

14. Исаева Н.А. Логический синтез процедур резервирования взаимосвязанных программных модулей в параллельных вычислительных системах // Труды XXXV Междунар. Конф. «Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе» (IT+SE'08). Май 2008. Украина. Ялта-Гурзуф. С. 64-68.

15. Исаева Н.А. Диагностирование ошибок при выполнении сложных задач управления с резервированием программных модулей в параллельных вычислительных системах // Труды XXXVI Междунар. Конф. "Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе" (IT+SE'09). Украина, Ялта-Гурзуф. Май 2009. С.35-37.

16. Игнатущенко В.В., Исаева Н.А., Подшивалова И.Ю. Проблема адаптивного резервирования вычислительных процессов для их надежного выполнения в управляющих параллельных вычислительных системах // Третья международная конференция по проблемам управления: Пленарные доклады и избранные труды. - М.: Институт проблем управления. 2006. ISBN-5-201-14989-8. С. 775-782.

17. 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.

18. Игнатущенко В.В., Исаева Н.А. Новая компьютерная технология: обеспечение надежного выполнения сложных наборов задач в управляющих параллельных вычислительных системах // Четвертая международная конференция по проблемам управления (26 – 30 января 2009 года): Сборник трудов. – М.: Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2009. – с. 1664-1678.

19. Иванов Н.Н., Игнатущенко В.В., Михайлов А.Ю. Статическое прогнозирование времени выполнения комплексов взаимосвязанных работ в многопроцессорных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 2005. № 6. С. 89-103.

