

УДК 004.272.26

ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАДЕЖНЫМ ВЫПОЛНЕНИЕМ КОМПЛЕКСОВ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО МНОГОВЕРСИОННОГО ИХ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Исаева Н.А., Милков М.Л.

*ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова»,
Российской академии наук, Москва, e-mail: nat_i@ipu.ru*

Рассматривается одно из направлений развития компьютерной технологии, направленной на обеспечение надежного выполнения сложных наборов задач (комплексов взаимосвязанных программных модулей) со случайными временами их выполнения в управляющих параллельных вычислительных системах реального времени. Цель работы – разработка и исследование адаптивного метода резервирования вычислительных процессов, базирующегося на сочетании различных вариантов многоверсионного их резервирования с асинхронным запуском программных модулей. Предложена математическая модель и правила ее функционирования для исследования свойств и эффектов динамического адаптивного многоверсионного резервирования программных модулей на основе прогнозирования надежного их выполнения в управляющих параллельных вычислительных системах – как в штатном режиме функционирования, так и в условиях ошибок (сбоев или отказов).

Ключевые слова: управляющие параллельные вычислительные системы, многоверсионное резервирование, отказоустойчивость

DYNAMIC CONTROL OF RELIABLE REALIZATION OF COMPLEXES OF THE INTERCONNECTED PROGRAM MODULES ON THE BASIS OF ADAPTIVE MULTIVERSION OF THEIR REDUNDANTISATION IN PARALLEL COMPUTING SYSTEMS OF REAL TIME

Isaeva N.A., Milkov M.L.

*V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences,
Moscow, e-mail: nat_i@ipu.ru*

One of the directions of development of the computer technology aimed at providing of reliable execution of difficult sets of tasks (complexes of interdependent program modules) having random times of execution in parallel control computing systems of real-time is considered. The operation purpose – development and research of the adaptive method of redundancy of the calculating processes basing on a combination of different variants of multiversion their redundancy with asynchronous start of program modules. The mathematical model and rules of its functioning for research of properties and effects of dynamic adaptive multiversion redundancy of program modules on the basis of forecasting of their reliable execution in parallel control computing systems – both in a standard mode of functioning, and in the conditions of errors (faults or failures) is offered.

Keywords: parallel control computing systems, multiversion redundancy, fault tolerance

Излагаемое исследование является составной частью разработки компьютерной технологии, направленной на обеспечение надежного выполнения сложных комплексов взаимосвязанных работ (КВР), являющихся комплексами взаимосвязанных программных модулей со случайными временами их выполнения в параллельных управляющих вычислительных системах (ВС), функционирующих в контурах управления реального времени [1–3]. Под надежным выполнением конкретного КВР в параллельной ВС понимается выполнение его за время, не превышающее заданное (пользователем) директивное время T_{max} , с требуемой (удовлетворяющей пользователя) вероятностью P [1]. Надежное выполнение КВР должно обеспечиваться как в штатном режиме функ-

ционирования управляющей ВС, так и в условиях внезапных неисправностей (сбоев, отказов) ее вычислительных ресурсов.

В рамках решения этой проблемы в работе предлагается способ организации адаптивного резервирования вычислительных процессов, базирующийся на сочетании различных вариантов многоверсионного резервирования (МР) с асинхронным запуском программных модулей КВР.

Под адаптивным резервированием вычислительных процессов (программных модулей – работ КВР) понимается выбор и настройка различных способов резервирования вычислительных процессов и/или их сочетаний в динамике выполнения КВР. Выбор и настройка способов резервирования КВР осуществляются на основе

статического (до выполнения КВР) прогнозирования надежного выполнения заданного пользователем КВР, а также на основе анализа, уточнения и оперативного использования статических прогнозов (рассматриваемых способов резервирования) в процессе реализации задач в параллельной ВС с учетом текущего состояния процессов и системы, в частности – в условиях сбоев или отказов ее вычислительных ресурсов [3, 4]. Перспективными компонентами адаптивного резервирования КВР являются рассматриваемые здесь варианты МР [5–8].

Цель данного исследования – организация адаптивного метода резервирования вычислительных процессов, базирующегося на сочетании различных вариантов многоверсионного их резервирования с асинхронным запуском работ КВР; разработка математической модели для исследования свойств и эффектов динамического адаптивного многоверсионного резервирования программных модулей КВР на основе статического прогнозирования надежного их выполнения в параллельных вычислительных системах – как в штатном режиме функционирования, так и в условиях ошибок (сбоев или отказов).

Теоретической базой разработки является математический аппарат обрывающихся марковских процессов (ОМП), статистических методов и теории массового обслуживания (ТМО), графовые модели КВР, математические модели многоверсионного резервированных КВР в параллельных ВС [5–8], методология динамического управления надежным выполнением взаимосвязанных программных модулей (работ КВР) на основе адаптивного их резервирования в управляющих параллельных ВС [4].

Результаты такого моделирования могут быть использованы для повышения отказоустойчивости управляющих параллельных ВС.

Организация адаптивного многоверсионного резервирования КВР

Базовый КВР (в терминологии и понятиях [1, 2]) включает исходный и резервный КВР и соответствует штатному (без ошибок) выполнению КВР; исходный КВР и резервный КВР образуют две параллельные «ветви» вычислений, независимые по данным одна от другой.

Как и в [5–8] – рассматриваются варианты МР работ КВР с кратностью резервирования $Z = 2$, т.е. каждой работе-оригиналу a_j исходного КВР соответствует работа-версия a'_j резервного КВР. Сравнение результатов этих работ осуществляется с помощью дополнительного программного модуля – работы сравнения b_j . Для организации ди-

намического адаптивного резервирования КВР рассмотрим следующие f версии (где f – номер версии) реализации базовых КВР, состоящих из двух «ветвей» вычислений:

1. Исходный КВР и КВР из работ-версий по [7, 8], – обозначим его как КВР_{Б1}.

2. Исходный КВР и резервный КВР из упрощенных вариантов исходных работ по [6, 7], – обозначим его как КВР_{Б2}.

3. Исходный КВР состоит из работ-версий КВР_{Б1}, а резервный КВР из упрощенных вариантов работ-версий (аналогично первому варианту МР по [5, 6]) – КВР_{Б3}.

Ключевыми понятиями для организации динамического адаптивного резервирования КВР являются контрольные события Z_j , тестовый фрагмент и Таблица прогнозов, которая содержит набор «критических точек» $T_{fcr}^{(j)}$, соответствующих контрольным событиям Z_j [1, 4]. Контрольные события Z_j – события завершения некоторых работ a_j КВР – например, отнесенных к «критическим процессам» КВР.

По тестовым фрагментам КВР оценивается время дообслуживания КВР в целом [4]. По контрольным событиям Z_j анализируются состояния процесса реализации КВР в ВС и осуществляется управление этим процессом на основе сравнения прогнозируемого (в статике) времени выполнения тестовых фрагментов КВР с временными параметрами реальных событий, происходящих в системе в динамике.

Смысл «критической точки» заключается в следующем: если дообслуживание КВР (выполнение его тестового фрагмента) начинается не позже момента $T_{fcr}^{(j)}$ – момента наиболее позднего начала выполнения тестового фрагмента КВР для каждой версии f реализации КВР, то обеспечивается «штатное» выполнение КВР в целом за время, не большее директивного времени T_{max} с заданной вероятностью P . По контрольному событию Z_j возможен переход к динамическому управлению резервированными вычислительными процессами в режиме реального времени выполнения КВР следующими v ($v = 1, \dots, 4$) способами (алгоритмами управления процессами дообслуживания КВР): КВР_{Б2} (способ v_1); КВР_{Б3} (способ v_2); использование только одной «ветви» вычислений – исходного КВР (способ v_3); КВР из работ-версий (способ v_4); либо вычислительный процесс может быть продолжен в «штатном» режиме – КВР_{Б1}.

Для реализации адаптивного МР резервирования – Таблица прогнозов содержит f (в нашем случае – пять) «критических точек» $T_{fcr}^{(j)}$ для каждого контрольного события

Z_j ; $T_{fcr 0}^{(j)}$ – для продолжения «штатного» выполнения базового КВР B_1 ; $T_{fcr v}^{(j)}$ ($v = 1, \dots, 4$) – для перехода к одному из четырех вышеописанных способов надежного дообслуживания базового КВР. Таким образом, заранее, в статике (т.е. до выполнения задач в ВС), Таблица прогнозов формируется значениями «критических точек» $T_{fcr}^{(j)}$ по предложенным в [4] процедурам.

Математическая модель

Для проведения исследования описанного подхода к организации адаптивного резервирования КВР на основе сочетания двух вариантов МР с асинхронным запуском работ КВР, разработана модифицированная математическая модель. По структуре эта модель аналогична унифицированной математической модели по [9] – при этом

$$X = \{(\mathbf{I}; \mathbf{P}; \mathbf{V}; m) : m = 0; \overline{(Z + C)N + D + Q}; C = \overline{1}; Z = \overline{0, 5}; Q = \overline{0, N}\}, \quad (1)$$

где $\mathbf{I} = (i_1, \dots, i_w)$ – номера работ в буфере Б; w – число работ в Б, причем $w = 0, (Z + C) \cdot (N - 1)$; $\mathbf{P} = (p_1, \dots, p_p, \dots, p_k)$ – вектор состояний ОП, i -й элемент этого вектора содержит номер работы, которая выполняется на ОП; k – общее число ОП (процессоров ВС); $\mathbf{V} = (\bar{v}_1, \dots, \bar{v}_i, \dots, \bar{v}_k)$ – набор векторов общей (суммарной) размерности $(Z + C)N + D + Q$, что соответствует общему числу $(Z + C)N$ работ базового КВР, БД и Q работ «отката»; вектор \bar{v}_i этого набора соответствует i -му ОП; элементами вектора \bar{v}_i являются номера тех работ, которые уже выполнены на ОП; m – общее количество выполненных работ преобразованного КВР, соответствующее сумме работ базового КВР, БД и работ «отката».

Отметим, что при штатном выполнении базового КВР, т.е. при отсутствии ошибок процессоров ВС ($D = 0, Q = 0$), мы получаем базовую математическую модель СМО для исследования и прогнозирования времени выполнения базового КВР.

Правила функционирования математической модели – это правила диспетчеризации работ, отражающие особенности организации различных способов резервирования КВР, программных диагностических процедур и формирования работ «отката» [9]. Опишем правила функционирования математической модели при возникновении контрольного события Z_j :

Организация резервирования штатным способом v_0

Правило 1. Если при возникновении контрольного события Z_j время дообслу-

параметры состояний и правила ее функционирования задаются с учетом свойств и характерных особенностей рассматриваемых вариантов МР.

Как и в [9], предлагаемая модель представляется в виде однофазной СМО состоящей из $k \geq 2$ обслуживающих приборов ОП (процессоров – П), буфера Б для готовых к выполнению работ, которые поступают из пула, содержащего в исходном состоянии N работ.

Пусть T – время жизни системы – время выполнения преобразованного КВР из N работ при заданной кратности резервирования Z, C работ сравнения, D работ программного блока диагностирования (БД) и Q работ «отката». Функционирование такой СМО можно описать обрывающимся Марковским процессом (ОМП) $X(t)$, $t \in [0, T)$ над следующим множеством состояний:

живания КВР $t_j^* > T_{fcr 0}^{(j)}$, то в динамике вычислений происходит переход к одному из вышеописанных способов v , – со значением $T_{fcr v}^{(j)}$ для которого выполняется условие $t_j^* \leq T_{fcr v}^{(j)}$ – в соответствии с далее приведенными правилами 2–5 или правилом 6.

Организация резервирования способами v_1, v_2

Правило 2. Готовые к выполнению работы-оригиналы a_j и работы-версии a'_j выбираются на выполнение на свободные процессоры ВС (обязательно различные) по известному критерию диспетчеризации «ранг r_j соответствующей вершины графа базового КВР B_2 (или КВР B_3) / связность s_j вершины» [1,2]. На процессор П, на котором выполнялась работа-оригинал a_j , с абсолютным приоритетом назначается работа сравнения b_j .

Правило 3. Если при выполнении работы b_j обнаружено несовпадение результатов выполнения работы a_j и a'_j , то с абсолютным приоритетом назначаются на выполнение работы БД по правилам, рассмотренным в [6]. Результатом функционирования БД является определение «координаты» ошибки (номера процессора), установление её типа (сбой или отказ) и идентификации работы КВР с искаженными результатами ее выполнения. На процессорах, не использованных для работ БД, продолжают выполняться работы базового КВР B_2 (или КВР B_3) в соответствии с правилом 2.

Правило 4. В случае обнаружения (с помощью БД) сбоя при выполнении любой

работы a_j КВР_{Б2} (или КВР_{Б3}) или работы b_j , а также в случае сбоя при выполнении любой работы a'_j резервной ветви КВР, подмножество $\{a'_j\}$ работ «отката» является пустым (кроме «работ отката по прерыванию БД»).

В остальных случаях подмножество $\{a'_j\}$ работ «отката» может оказаться не пустым (помимо «работ отката по прерыванию БД») и включает:

- непосредственных или транзитивных приемников работы a_j (a'_j), которые воспользовались искаженными результатами этой работы (назначены на выполнение или уже выполнены) до момента обнаружения ошибки;

- работы исходного или резервного КВР_{Б2} (или КВР_{Б3}), не являющиеся приемниками работы a_j (a'_j), но выполнялись на отказавшем процессоре до момента обнаружения ошибки.

Правило 5. По окончании выполнения работ БД и работ «отката» $\{a'_j\}$ в динамике

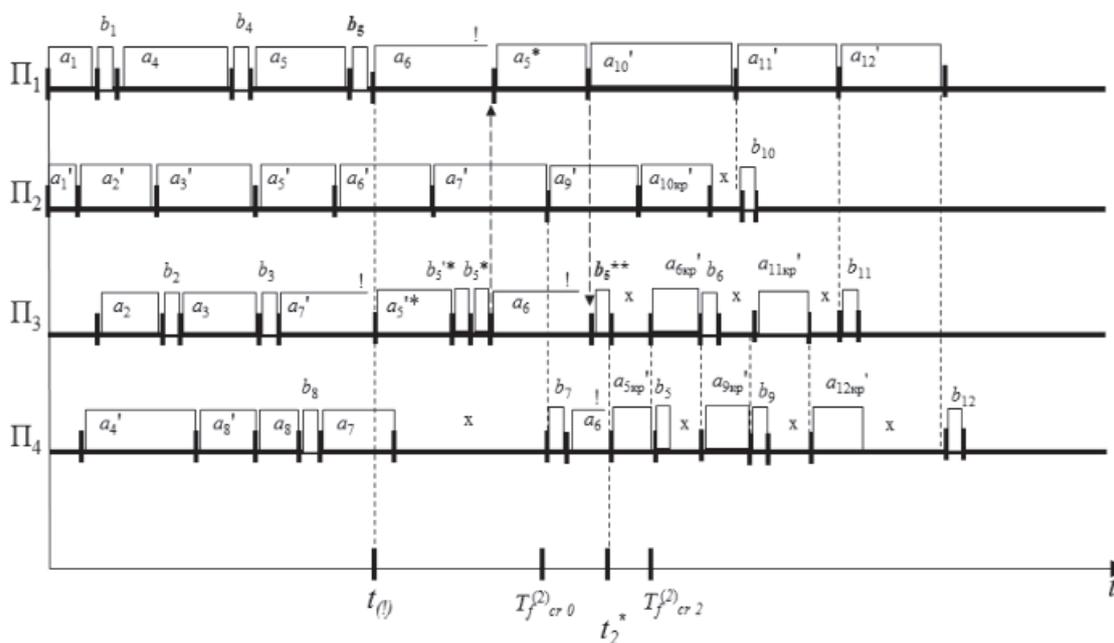
вычислений происходит переход к способу организации вычислительного процесса (алгоритма управления дообслуживанием КВР) – v_3, v_4 , т.е. к использованию только одной ветви вычислений, в соответствии с правилом 6.

Организация резервирования способами v_3, v_4

Правило 6. Работы сравнения вообще не назначаются на выполнение; исправные процессоры предоставляются работам только исходного КВР (или КВР из работ-версий); результаты выполнения последнего используются в качестве результатов выполнения соответствующего преобразованного КВР.

Пример реализации

На рисунке представлена временная диаграмма одной из возможных реализаций динамического адаптивного МР резервирования, для КВР с $N = 12, k = 4$.



Временная диаграмма реализации адаптивного динамического многоверсионного резервирования КВР для случая ошибки (сбоя) при выполнении работы-оригинала a_5

Работа сравнения b_5 в момент времени $t_{(1)}$ обнаружила несоответствие результатов работ a_5 и a'_5 . Программный БД показал, что произошел *сбой* при выполнении работы a_5 на процессоре Π_1 . Момент завершения последней работы БД – работы b_5^{**} – соответствует контрольному событию $Z_2 - t_2^*$.

В приведенном примере время наступления контрольного события t_2^* больше значения соответствующего критического времени $T_f(Z_2)_{cr}$. Следовательно, согласно правилу математической модели необходимо переходить к какому-либо другому алгоритму управления дообслуживанием КВР – со значением $T_f(Z_2)_{cr}$, для которо-

го выполняется условие $t_2^* \leq T_f(Z_2)_{crv}$. По таблице прогнозов определяем, что такому условию удовлетворяет способ резервирования $\nu = 2$, т.е. переход к реализации КВР_{БЗ}, что и отражено на рисунке.

Заключение

Предложен подход к организации адаптивного динамического резервирования взаимосвязанных программных модулей на основе сочетаний двух вариантов многоверсионного резервирования с асинхронным запуском программных модулей (работ) КВР. Разработана математическая модель и алгоритмические методы для исследования свойств и эффектов адаптивного многоверсионного резервирования программных модулей КВР для обеспечения надежного выполнения комплексов резервированных программных модулей в управляющих параллельных вычислительных системах – как в штатном режиме функционирования ВС, так и в условиях ошибок (сбоев или отказов).

Список литературы

1. Елисеев В.В., Игнатушенко В.В. О проблеме надежного выполнения сложных наборов задач в управляющих параллельных вычислительных системах // Проблемы управления. – 2006. – № 6. – С. 6–18.
2. Игнатушенко 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.
3. Игнатушенко В.В., Исаева Н.А. Интеллектуальное динамическое управление параллельными резервированными взаимосвязанными задачами со случайными временами их выполнения в управляющих параллельных вычислительных системах // Параллельные вычисления и задачи управления: труды пятой международной конференции (РАСО'2010). – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, РАН, 2010. – С. 643–651.
4. Исаева Н.А. Организация динамического адаптивного резервирования взаимосвязанных программных модулей в управляющих параллельных вычислительных системах реального времени // Управление развитием крупномасштабных систем: Труды пятой международной конференции (MLSD'2011) (3–5 октября 2011 г., Москва, Россия). Т. II. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, РАН, 2011. – С. 230–238.
5. Игнатушенко 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.
6. Милков М.Л. Исследование способов диспетчеризации работ для одного из вариантов многоверсионного резервирования взаимосвязанных программных модулей в управляющих параллельных вычислительных системах // Открытое образование. – 2011. – № 2 (85), Ч. 2. – С. 48–52.
7. Исаева Н.А., Милков М.Л. Организация многоверсионного резервирования взаимосвязанных задач со случайными временами их выполнения в управляющих параллельных вычислительных системах реального времени: новый подход // Управление развитием крупномасштабных систем: труды пятой международной конференции (MLSD'2011) (3–5 октября 2011 г., Москва, Россия). Т. II. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, РАН, 2011. – С. 152–157.
8. Исаева Н.А., Милков М.Л. Организация диагностирования ошибок для одного из вариантов многоверсионного резервирования взаимосвязанных программных модулей в управляющих параллельных вычислительных системах //

Параллельные вычисления и задачи управления: Труды шестой Международной конференции (РАСО'2012) (24–26 октября 2012 г., Москва, Россия). – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, РАН, 2012. – С. 140–149.

9. Исаева Н.А. Унифицированная математическая модель системы массового обслуживания для прогнозирования надежного выполнения взаимосвязанных программных модулей (задач) при различных методах и сочетаниях их резервирования в управляющих параллельных вычислительных системах // Открытое образование. – 2011. – № 2 (85), Ч. 2. – С. 55–59.

References

1. Eliseev V.V., Ignatushhenko V.V. O probleme nadezhnogo vypolneniya slozhnykh naborov zadach v upravlyayushhikh parallel'nykh vychislitel'nykh sistemakh // Problemy upravleniya. 2006. no. 6. pp. 6–18.
2. Ignatushhenko V.V., Isaeva N.A. Rezervirovanie vzaimosvyazannykh programnykh modulej dlya upravlyayushhikh parallel'nykh vychislitel'nykh sistem: organizatsiya, otsenka otkazoustojchivosti, formalizovannoe opisanie // Avtomatika i telemekhanika. 2008. no. 10. pp. 142–161.
3. Ignatushhenko V.V., Isaeva N.A. Intel'ktual'noe dinamicheskoe upravlenie parallel'nymi rezervirovannymi vzaimosvyazannymi zadachami so sluchajnymi vremenami ikh vypolneniya v upravlyayushhikh parallel'nykh vychislitel'nykh sistemakh // Trudy pyatoy mezhdunarodnoj konferentsii «Parallel'nye vychisleniya i zadachi upravleniya» (РАСО'2010). М.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova, RAN. 2010. pp. 643–651.
4. Isaeva N.A. Organizatsiya dinamicheskogo adaptivnogo rezervirovaniya vzaimosvyazannykh programnykh modulej v upravlyayushhikh parallel'nykh vychislitel'nykh sistemakh real'nogo vremeni // Trudy pyatoy mezhdunarodnoj konferentsii «Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2011)» (3–5 oktyabrya 2011 g., Moskva, Rossiya). Tom II. М.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova, RAN. 2011. pp. 230–238.
5. Ignatushhenko V.V., Milkov M.L., Sidorov A.V. Mnogoversionnoe rezervirovanie vzaimozavisimykh parallel'nykh zadach dlya upravlyayushhikh parallel'nykh vychislitel'nykh sistem: formalizovannoe opisanie, otsenka otkazoustojchivosti // Nadezhnost'. 2009. no. 4. pp. 44–61.
6. Milkov M.L. Issledovanie sposobov dispetcherizatsii rabot dlya odnogo iz variantov mnogoversionnogo rezervirovaniya vzaimosvyazannykh programnykh modulej v upravlyayushhikh parallel'nykh vychislitel'nykh sistemakh // Otkrytoe obrazovanie. 2011. no. 2 (85), CH. 2. pp. 48–52.
7. Isaeva N.A., Milkov M.L. Organizatsiya mnogoversionnogo rezervirovaniya vzaimosvyazannykh zadach so sluchajnymi vremenami ikh vypolneniya v upravlyayushhikh parallel'nykh vychislitel'nykh sistemakh real'nogo vremeni: novyj podkhod // Trudy pyatoy mezhdunarodnoj konferentsii Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2011) (3–5 oktyabrya 2011 g., Moskva, Rossiya). T. II. М.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova, RAN. 2011. S. 152–157.
8. Isaeva N.A., Milkov M.L. Organizatsiya diagnostirovaniya oshibok dlya odnogo iz variantov mnogoversionnogo rezervirovaniya vzaimosvyazannykh programnykh modulej v upravlyayushhikh parallel'nykh vychislitel'nykh sistemakh // Trudy shestoy Mezhdunarodnoj konferentsii «Parallel'nye vychisleniya i zadachi upravleniya» (РАСО'2012) (24–26 oktyabrya 2012 g., Moskva, Rossiya). М.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova, RAN. 2012. pp. 140–149.
9. Isaeva N.A. Unifitsirovannaya matematicheskaya model' sistemy massovogo obsluzhivaniya dlya prognozirovaniya nadezhnogo vypolneniya vzaimosvyazannykh programnykh modulej (zadach) pri razlichnykh metodakh i sochetaniyakh ikh rezervirovaniya v upravlyayushhikh parallel'nykh vychislitel'nykh sistemakh // Otkrytoe obrazovanie. 2011. no. 2 (85), CH. 2. pp. 55–59.

Рецензенты:

Каравай М.Ф., д.т.н., зав. лаб., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва;

Полеткин А.Г., д.т.н., зав. лаб., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 15.07.2014.