

УДК 004.75

С.В. Минухин

Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця, Харьков

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ПАКЕТОВ ЗАДАНИЙ С ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ И ВЫБОРА РЕСУРСОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены методы планирования пакетов заданий в распределенных вычислительных системах. Сформулировано предположение о возможности использования ограничения на загрузку ресурсов в условиях входных потоков заданий, имеющих высокую интенсивность, для улучшения экономических показателей работы вычислительных систем. В качестве подхода предложена модификация метода планирования на основе решения задачи о наименьшем покрытии, использующего перепланирование в тех случаях, когда предварительно рассчитываемые коэффициенты использования ресурсов превышают заданные пороговые значения. Для компенсации уменьшения коэффициента использования ресурсов предлагается метод выбора ресурсов, базирующийся на статистическом анализе времени решения заданий на ресурсах системы.

Ключевые слова: *распределённая вычислительная система, ресурс, задача о наименьшем покрытии, коэффициент использования, время ответа.*

Введение

В распределённых вычислительных системах обеспечивается решение высокомасштабируемых заданий, являющихся научными задачами или же технологически связанными между собой заданиями, требующими значительных вычислительных ресурсов, процессорного времени и использующих большое количество данных. При этом основной целью является декомпозиция больших заданий на более простые с точки зрения их обработки, которые могут быть зависимыми или независимыми заданиями. Учитывая, что ресурсы вычислительных систем могут иметь различный уровень гетерогенности (неоднородности), задача назначения ресурсов заданиям является сложной, относящейся к классу NP-трудных задач, требующей своего решения. Как показали исследования, в настоящее время существует значительное количество эвристик, позволяющих решать данную задачу, оптимизируя при этом различные целевые функции. Перспективными являются методы многокритериального планирования, в которых функции цели одновременно используют несколько простых критериев. Процедуры назначения ресурсов заданиям и управление их выполнением на распределенных ресурсах системы представляют собой процессы планирования. Все методы планирования можно разбить на два больших класса: пакетный режим (batchmode) и немедленный (on-linemode).

В первом классе методов поступающие на обработку задания собираются в пакеты (collections), называемые метазаданиями (metatasks) или портфелем заданий (BagofTasks, BoT) и планируются в определенные промежутки времени, называемые

событиями. Во втором классе методов задания поступают на обработку сразу же после их поступления в систему. Так как производительности ресурсов системы значительно отличаются вследствие их гетерогенности, время решения заданий на ресурсах также будет различным, и представляется в пакетном методе в виде матрицы ETC (EstimatedTime-Compute, оценка времени выполнения). Фактически она представляет собой матрицу соответствия, в ячейках которой находятся рассчитываемое время решения заданий на ресурсах, а в случае невозможности получения решения принимает значение, равное бесконечности. Отметим, что планироваться могут и множества пакетов заданий, отличающихся между собой их мощностью (количеством заданий, входящих в каждый из пакетов).

Еще одним методом пакетного планирования является метод на основе решения задачи о наименьшем покрытии (ЗНП) [1, 2, 5]. Суть метода заключается в разбиении входного потока заданий на множества заданий, называемых пулом, построении матрицы соответствия «задания-ресурсы» и решении ЗНП, результатом которого является минимальное количество максимально загруженных ресурсов системы, на которых могут выполняться все задания, вошедшие в пул.

Отличием матрицы соответствия в методе ЗНП от матрицы ETC является то, что в ее ячейки записывается не оцениваемое время решения задания на данном ресурсе, а в случае возможного решения данного задания на данном ресурсе значение «1». Плотность единиц, называемая универсальностью заданий [1, 2] формируемой таким образом матрицы определяет особенности использования ЗНП для решения задач планирования.

Необходимо отметить, что в двухуровневой распределенной вычислительной системе (РВС) использование метода планирования на основе ЗНП приводит к необходимости:

обеспечения балансировки нагрузки на вычислительные ресурсы;

оптимизации критериев функционирования системы на основе повышения производительности используемого метода планирования;

оптимизации работы узлов системы с точки зрения энергопотребления с учетом того факта, что при уровне загрузки процессоров, превышающем некоторое пороговое для конкретного процессора значение, его энергопотребление существенно нелинейно возрастает, что требует дополнительных энергозатрат на воздушное и/или водяное охлаждение.

Целью данного исследования является разработка метода планирования пакетов заданий, поступающих в РВС на обработку с высокой интенсивностью, на основе решения ЗНП, использующего идею ограничения коэффициента использования гетерогенных ресурсов вычислительной системы, также метод выбора ресурсов.

Методы пакетного планирования заданий и критерии производительности

Важным представляется ответ на вопрос формального определения проблемы планирования в РВС. Проблема планирования – это совокупность вопросов, потому что планирование ресурсов зависит от многих параметров, а также от требований заданий. Типичный сценарий выглядит следующим образом: приложение (задание) может включать несколько работ, которые, в свою очередь, могут состоять из подзадач; требуется в простейшем случае выбрать наиболее подходящие ресурсы для выполнения задания. Несмотря на то, что задачи планирования являются одними из наиболее изученных проблем оптимизации работы РВС, имеется несколько факторов, которые усложняют решение проблемы определения требуемых ресурсов. К ним следует отнести:

а) динамическую структуру РВС (грид-систем, мультикластерных систем). В отличие от традиционных распределенных систем ресурсы грид-системы могут включаться или исключаться из нее случайным образом. Это может произойти из-за разрыва подключения к системе или потому, что их владельцы выключили машину (узел);

б) высокую гетерогенность ресурсов. Вычислительные ресурсы могут быть очень разнородными по их вычислительной мощности, начиная от ноутбуков, настольных компьютеров, до кластеров и суперкомпьютеров;

в) высокую гетерогенность (неоднородность) заданий. Задания РВС неоднородны с точки зрения

их вычислительных требований;

г) высокую неоднородность коммуникационных систем. Ресурсы подключаются через интернет, используя при этом различные сети, и, следовательно, необходимо учитывать неоднородность взаимно подключаемых компьютерных сетей;

д) наличие локальных планировщиков. Единая система вычислительных ресурсов между различными институтами, вузами, предприятиями и физическими лицами использует локальные ресурсы, которые требуют координации с планировщиками более высокого уровня (метапланировщиками);

е) использование локальных политик на локальных ресурсах;

е) требования к ресурсам. Планировщики предполагают полную доступность и совместимость ресурсов при планировании. В реальных же ситуациях ограничения и/или их несовместимость могут зависеть от конкретного задания и характеристик ресурсов.

В общем случае, планировщик работает следующим образом: получает новые задания, проверяет наличие доступных ресурсов, выбирает соответствующие ресурсы согласно критериям эффективности и осуществляет планирование заданий на выбранные ресурсы. Для того чтобы реализовать процесс планирования в РВС, планировщик должен выполнить:

- а) подготовку и сбор информации по заданиям;
- б) выбор ресурсов;
- в) планирование заданий на выбранные ресурсы;
- г) расчет (задания или приложения) и распределение в соответствии с планированием (сопоставление задания и выбранных ресурсов);
- д) мониторинг выполнения заданий.

Характеристиками эффективности работы РВС являются балансировка загрузки, использование ресурсов, время ожидания в очереди, пропускная способность и время отклика (отклика) системы. Критерии оптимизации планирования включают *makespan*, коэффициент использования ресурсов, балансировка нагрузки ресурсов, близость сроков выполнения заданий, общее взвешенное время завершения заданий, суммарное запаздывание заданий и т.д. [4].

Временные критерии. *Makespan* – это показатель общей производительности системы: его малое значение означает, что планировщик обеспечивает хорошее и эффективное планирование заданий на ресурсы. Другим критерием является *flowtime*, который характеризует время ответа системы при выполнении конкретного задания. Минимизация величины *flowtime* предусматривает уменьшение среднего времени отклика системы. По существу необходимо максимизировать производительность работы системы посредством уменьшения времени

планирования и выполнения заданий, обеспечивая требуемое значение QoS (качества обслуживания).

Коэффициент использование ресурсов. Данный критерий предполагает максимизацию использования ресурсов РВС [4]. Достижение высокого значения коэффициента использования ресурсов является проблемой в РВС с учетом высокого уровня гетерогенности вычислительных ресурсов. Уровень использования ресурсов может определяться на основе среднего значения коэффициента использования ресурсов. Например, в ETC-модели для планировщика S этот коэффициент avg_{util} может быть получен следующим образом [4]:

$$avg_{util} = \frac{\sum_{i \text{ Machines}} completion(i)}{makespan * b_{machines}},$$

и при этом необходимо максимизировать это значение для всех возможных планировщиков.

Принято считать, что с точки зрения владельца ресурсов коэффициент использования ресурсов является QoS-условием.

Соответствие. Этот показатель предназначен для согласования заданий с ресурсами, которые наилучшим образом соответствуют их вычислительным требованиям. В модели ETC соответствие может быть определено как степень близости данного (полученного) расписания к минимальному времени выполнения (MinimumExecutionTime, MET) и выбранного метода планирования. Следует отметить, что большое значение соответствия означает, что большое количество заданий назначается ресурсу. Формально для планировщика S величина соответствия может быть определена по формуле:

$$matching_{proximity} = \frac{\sum_{i \text{ tasks}} ETC(i)S(i)}{\sum_{i \text{ tasks}} ETC(i)MET(i)}.$$

Средневзвешенное время ответа. Пусть w_j – вес задания j , F_j – время его завершения, R_j – время представления (поступления) задания в систему. Тогда средневзвешенное время ответа определится как:

$$\frac{\sum_{j \text{ tasks}} w_j (F_j)(F_j - R_j)}{\sum_{j \text{ tasks}} w_j},$$

где $(F_j - R_j)$ – время ответа системы для задания j .

Методы пакетного планирования.

Min-min алгоритм. Min-min алгоритм начинается с набора всех нераспределенных заданий [4]. Все нераспределенные задания помещаются в метазадание T. Min-min алгоритм работает в два этапа. На этапе 1 алгоритм вычисляет ожидаемое время завершения каждого задания на всех ресурсах. Далее вычисляется минимальное время выполнения среди всех заданий. На этапе 2 алгоритм выбирает задание с

минимальным временем завершения среди всех ресурсов и распределяет его на этот ресурс. Задание удаляется из списка заданий. Процесс повторяется до тех пор, пока все задания не распределятся на ресурсы.

Min-Mean эвристический алгоритм планирования заданий работает в два этапа [4]. На первом этапе алгоритм Min-Mean алгоритм рассчитывает время завершения каждого задания для каждого ресурса и находит минимальное время завершения заданий на ресурсах. После этого задание удаляется из очереди заданий. Далее алгоритм определяет среднее время завершения всех заданий и на втором этапе выбирает те ресурсы, время завершения заданий на которых больше, чем среднее время. После этого алгоритм сортирует выбранные ресурсы в порядке убывания времени выполнения на них заданий и перепланирует задания, распределенные на ресурсы, время завершения которых меньше среднего времени завершения всех заданий очереди.

Метод планирования пакетов заданий на основе решения задачи о наименьшем покрытии с ограничением на загрузку ресурсов распределенной вычислительной системы

Предлагаемый метод планирования пакетов заданий с ограничением на загрузку ресурсов базируется на модели планирования, предложенной в работах [1, 2], включает последовательность выполнения следующих шагов:

а) из глобальной очереди заданий в соответствии с их приоритетами выбираются задания до тех пор, пока пул не будет полностью заполнен;

б) формирование пакетов заданий осуществляется на основе решения ЗНП, при этом исходными данными для ее решения является таблица соответствия, построенная для заданий, которые вошли в текущий пул [1]. На этом этапе на основе решения ЗНП определяется минимальное количество ресурсов, на которых задания, вошедшие в пул, могут быть выполнены. При этом сначала формируется пакет заданий на ресурс, который вошел в покрытие, и на нем возможно решение наибольшего количества заданий, далее формируется пакет на ресурс из покрытия с наибольшими возможностями по решению заданий среди оставшихся ресурсов, принадлежащих покрытию и т.д.;

в) по мере освобождения ресурсов пакеты заданий отправляются на решение локальным планировщикам. Ресурс предполагается свободным, если его текущий коэффициент использования меньше некоторого задаваемого (известного) порогового значения, определяемого в пределах 70–80 % от максимального. Текущее значение коэффициента использования ресурса K_i определяется по формуле:

$$K_{\Pi} = T_{R_j} / T_N, \quad (1)$$

где T_{R_j} – время выполнения всех заданий глобальной очереди на ресурсе R_j на текущий момент времени, тактов; T_N – суммарное время работы системы на текущий момент времени, тактов.

Пример работы алгоритма планирования на основе ЗНП с ограничением на текущий коэффициент использования ресурсов.

Пусть исходная матрица соответствия имеет следующий вид (табл. 1) [1]. Далее рассмотрим такты планирования на основе этой матрицы.

Таблица 1

Исходная матрица соответствия

Задание	Ресурс							
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈
task ₁	1	1	1	1	1	1	0	1
task ₂	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₃	1	1	1	0	1	1	1	1
task ₄	1	1	1	1	1	1	0	1
task ₅	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₆	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₇	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₈	1	1	1	1	1	1	0	1
task ₉	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₀	1	1	1	0	1	1	1	1
task ₁₁	1	1	1	0	1	1	1	1
task ₁₂	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₃	1	1	1	1	1	1	0	1
task ₁₄	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₅	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₆	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₇	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₈	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₉	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₂₀	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₂₁	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₂₂	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₂₃	1	1	1	0	1	1	1	1
task ₂₄	1	1	1	0	1	1	1	1

Такт 1. В соответствии с алгоритмом решения ЗНП на первом такте планирования выбраны ресурсы R_1, R_2, R_5, R_6 и R_8 , потому что на них решается максимальное количество заданий. Из них выбираются первые по списку, и все задания распределяются на них (табл. 2).

Такт 2. Далее из глобальной очереди выбираются следующие 12 заданий и осуществляется их планирование на ресурсы согласно таблице соответствия (табл. 1). Результат приведен в табл. 3.

Таблица 2

Матрица соответствия

Задание	Ресурсы							
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈
task ₁	1	1	1	1	1	1	0	1
task ₂	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₃	1	1	1	0	1	1	1	1
task ₄	1	1	1	1	1	1	0	1
task ₅	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₆	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₇	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₈	1	1	1	1	1	1	0	1
task ₉	1	1	0	0	1	1	0	1
task ₁₀	1	1	1	0	1	1	1	1
task ₁₁	1	1	1	0	1	1	1	1
task ₁₂	1	1	1	0	1	1	0	1

Таблица 3

Матрица соответствия

Задание	Ресурсы							
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈
task ₁₃	1	1	1	1	1	1	0	1
task ₁₄	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₅	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₆	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₇	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₈	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₁₉	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₂₀	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₂₁	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₂₂	1	1	1	0	1	1	0	1
task ₂₃	1	0	0	0	0	0	0	0
task ₂₄	1	1	0	0	0	0	0	0

Перед планированием заданий на ресурсы необходимо рассчитать значение текущего коэффициента использования в соответствии с формулой (1). Так как используется модель планирования с ограничением на текущее значение коэффициента использования ресурсов, а для ресурсов R_1, R_2 он превышает пороговое значение (этот вывод сделан вследствие того, что все задания могут решиться на этих ресурсах), то задания на эти ресурсы не распределяются. Таким образом, необходимо перестроить матрицу соответствия (табл. 3), чтобы недоступные ресурсы были из нее исключены (в матрице соответствия помещаем нули в соответствующие ячейки). Результат работы алгоритма на данном такте планирования приведен в табл. 4.

Таблица 4

Матрица соответствия

Задание	Ресурсы							
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈
task ₁₃	0	0	1	1	0	1	0	1
task ₁₄	0	0	1	0	0	1	0	1
task ₁₅	0	0	1	0	0	1	0	1
task ₁₆	0	0	1	0	0	1	0	1
task ₁₇	0	0	1	0	0	1	0	1
task ₁₈	0	0	1	0	0	1	0	1
task ₁₉	0	0	1	0	0	1	0	1
task ₂₀	0	0	1	0	0	1	0	1
task ₂₁	0	0	1	0	0	1	0	1
task ₂₂	0	0	1	0	0	1	0	1
task ₂₃	0	0	0	0	0	0	0	0
task ₂₄	0	0	0	0	0	0	0	0

Метод выбора ресурсов

С целью компенсации результатов использования рассмотренного метода планирования, приводящего к уменьшению коэффициента использования ресурсов, предлагается метод выбора ресурсов, использующий при формировании матрицы соответствия информацию о сложности задания, рассчитываемое время решения заданий на ресурсах с различной производительностью и алгоритм выбора ресурсов, использующий статистический анализ времени выполнения заданий на ресурсах [1 – 3]. Для проведения экспериментов использованы следующие настроечные параметры модели: количество заданий входного потока – 10 000; сложность задания – 10 000 тактов (СКО – 1 %); ресурсы с производительностью 100, 150, 200, 250, 300 тактов; пул – 100; интенсивность входного потока – 100;

количество ресурсов – 10 и 100; количество наблюдений – 20; пороговое значение K_n определялось по нормальному закону $N(0,7; 0,1)$.

Алгоритм выбора ресурсов сводится к выполнению следующей последовательности шагов:

Шаг 1. Для каждого задания, входящего в пул, определяется время его выполнения на всех ресурсах системы R_j .

Шаг 2. Определяется среднее время выполнения всех заданий на ресурсах системы.

Шаг 3. В матрице соответствия для каждого задания записывается значение «1», если время выполнения задания на этом ресурсе меньше среднего времени выполнения данного задания на всех ресурсах R_j .

Шаг 4. Для полученной матрицы соответствия определяется универсальность заданий [1, 2, 5], рассчитываемая как отношение количества единиц матрицы к величине, определяемой как произведение количества строк на количество столбцов матрицы соответствия (плотность единиц).

Шаг 5. Для полученной плотности единиц путем статистического анализа определяется закон распределения универсальности заданий, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение.

Для моделирования работы имитационной модели планирования полученный закон распределения используется в ее настройках, определяющих универсальность поступающих на обработку заданий [2, 5].

На рис. 1 – 3 приведены результаты экспериментального исследования предлагаемого метода, показывающие полученные зависимости текущего значения коэффициента использования ресурсов от количества ресурсов на различных тактах планирования для различного количества ресурсов системы, на рис. 4 – 5 – зависимости МО времени ответа системы и МО коэффициента использования для различных модификаций метода решения ЗНП [5].

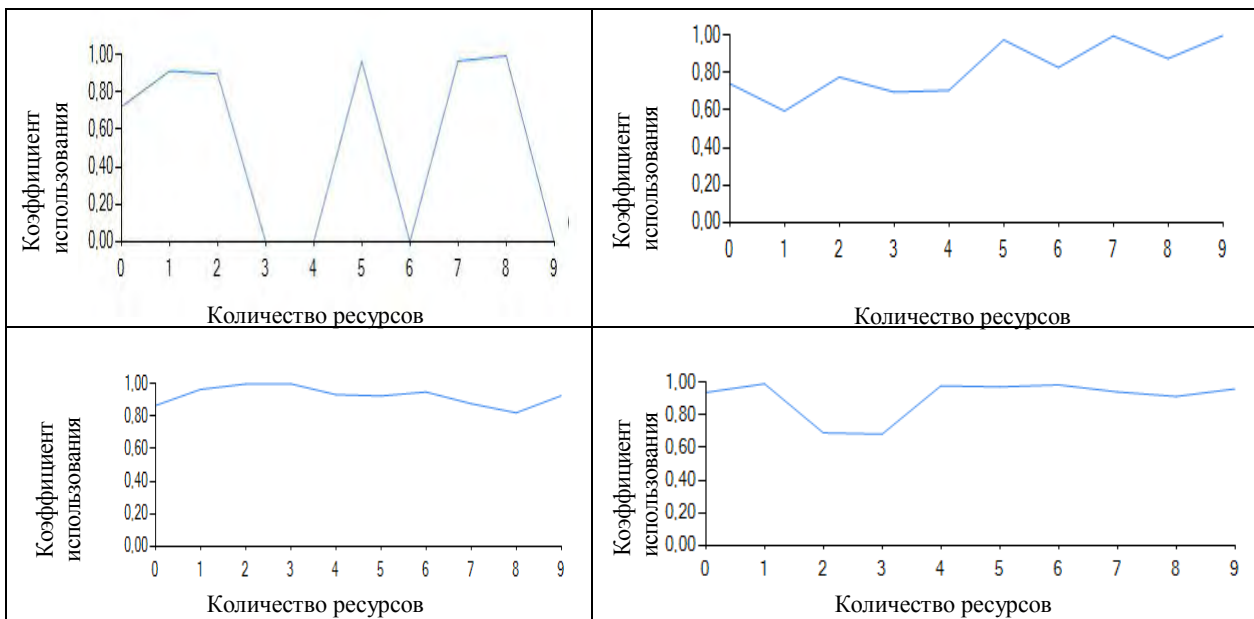


Рис. 1. Зависимость текущего коэффициента использования от количества ресурсов при отсутствии ограничений на загрузку ресурсов на различных тактах планирования(10 ресурсов)

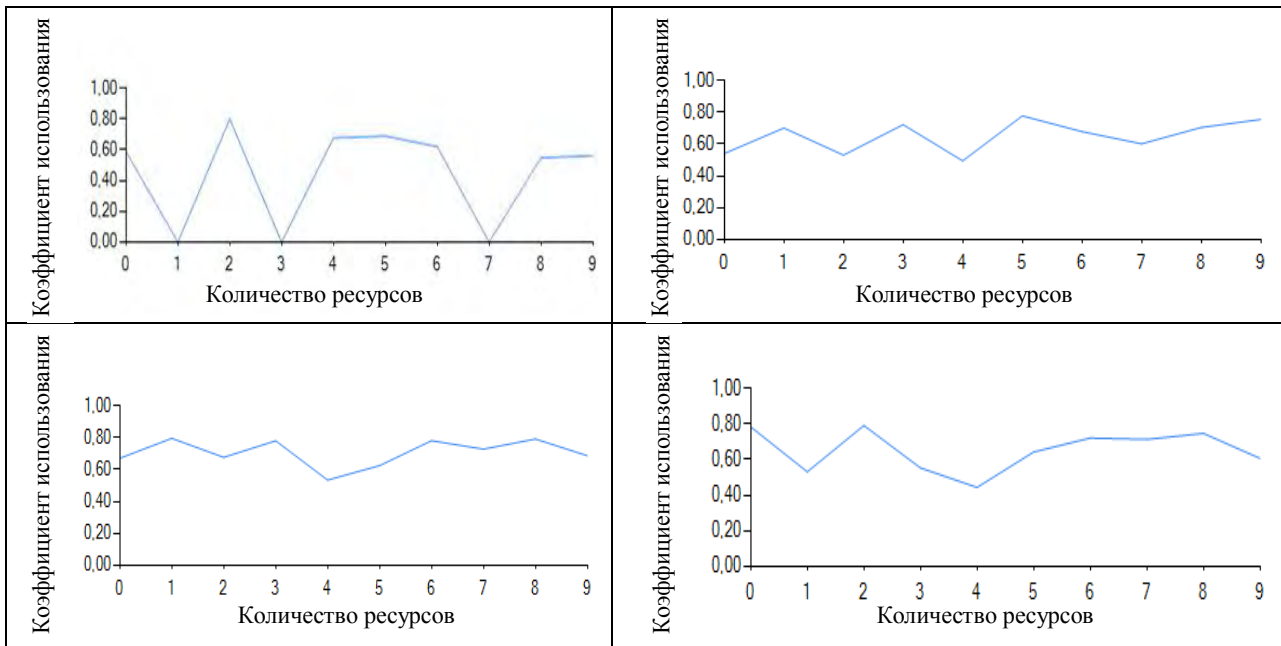


Рис. 2. Зависимость текущего коэффициента использования от количества ресурсов при ограничениях на загрузку ресурсов на различных тактах планирования (10 ресурсов)

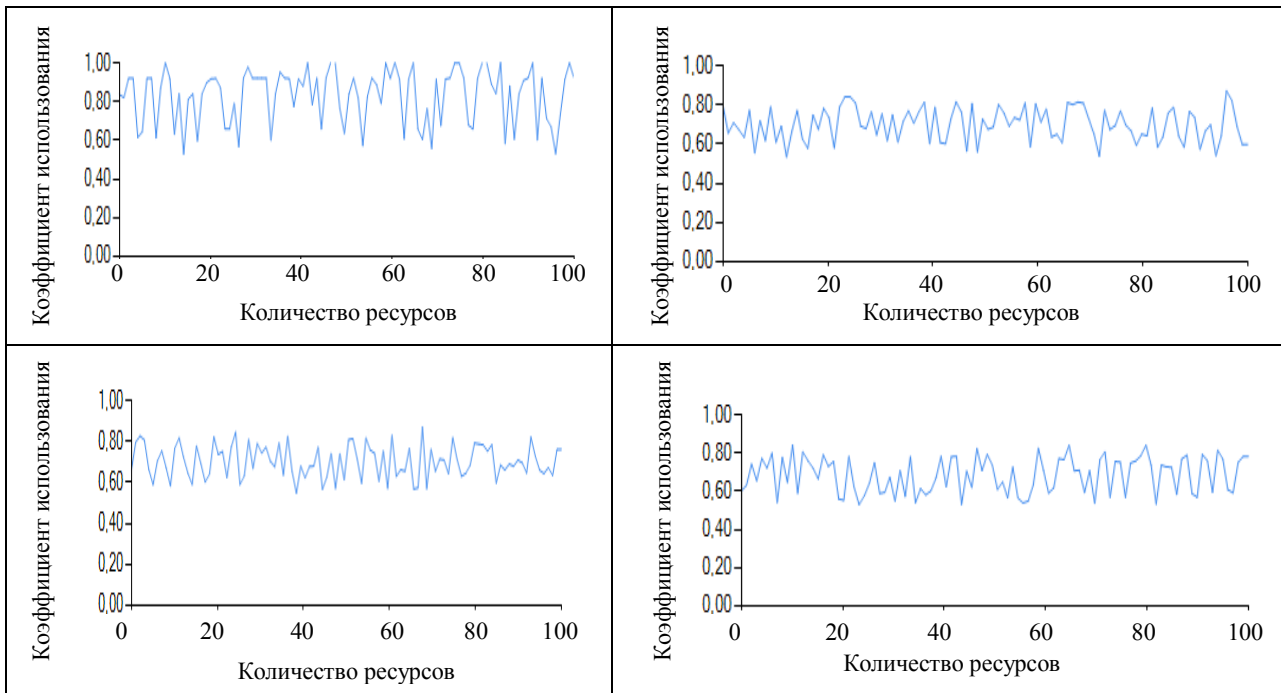


Рис. 3. Зависимость текущего коэффициента использования от количества ресурсов при ограничениях на загрузку ресурсов (100 ресурсов)

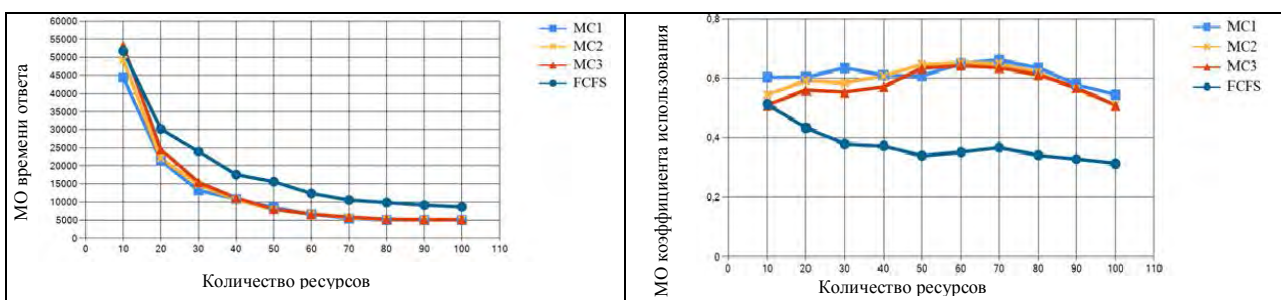


Рис. 4. Зависимость МО времени ответа и МО коэффициента использования от количества ресурсов при ограничении на загрузку ресурсов (случайное распределение)

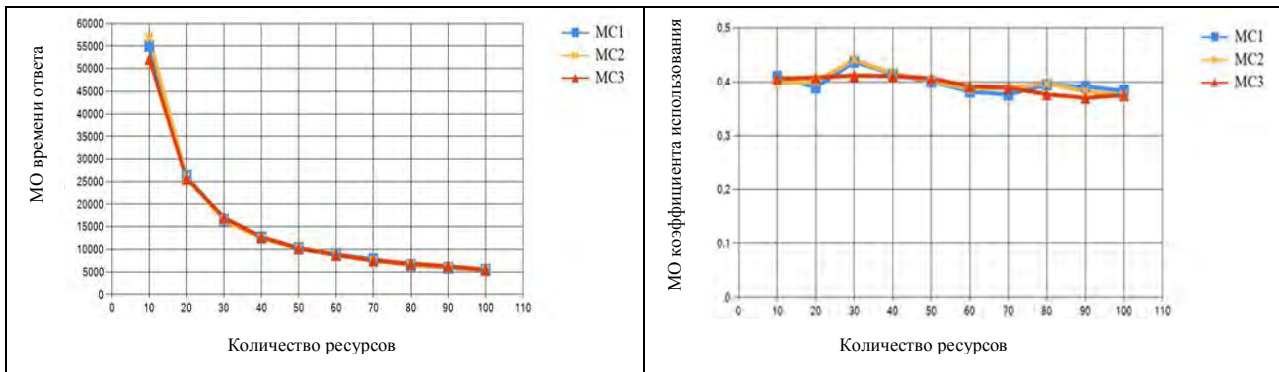


Рис. 5. Зависимость МО времени ответа и МО коэффициента использования от количества ресурсов при ограничении на загрузку ресурсов (метод выбора ресурсов)

Некоторые отличия зависимостей МО коэффициента использования ресурсов на рис. 4, 5 объясняются тем, что для обеспечения эффекта использования случайного калибровочного значения для порога коэффициента использования ресурсов среднее квадратическое отклонение для аппроксимирующего случайного распределения выбиралось равным 2σ , где σ – среднее квадратическое отклонение универсальности заданий, полученное как результат работы предложенного алгоритма выбора ресурсов для матрицы соответствия.

Список литературы

1. Листровой С.В. Модель и подход к планированию распределения ресурсов в гетерогенных Грид-системах / С.В. Листровой, С.В. Минухин // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». – 2012. – № 5. – С. 120-133.

2. Минухин С.В. Имитационная модель и ее программная реализация планирования ресурсов Грид-системы / С.В. Минухин, С.В. Знахур // Проблемы програмування. – 2012. – № 2–3. Спеціальний випуск. – С. 133-143.

3. Минухин С.В. Исследование методов пакетного планирования ресурсов в Грид-системах / С.В. Минухин // Вестник ХНТУ. – 2012. – №1 (44). – С. 242-250.

4. Xhafa F. Computational models and heuristic methods for Grid scheduling problems / F. Xhafa, A. Abraham // Future Generation Computer Systems. – 2010. – Vol. 26, issue 4. – P. 608–621.

5. Минухин С.В. Модели и методы решения задач планирования в распределенных вычислительных системах: монография / С.В. Минухин. – Х.: Изд-во ООО «Щедрая усадьба плюс», 2014. – 324 с.

Поступила в редколлегию 27.02.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.О. Алексеев, Харьковский национальный автомобильный университет, Харьков.

МЕТОД ПЛАНУВАННЯ ПАКЕТІВ ЗАВДАНЬ З ВИСОКОЮ ІНТЕНСИВНІСТЮ І ВИБОРУ РЕСУРСІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

С.В. Мінухін

Розглянуто методи планування пакетів завдань в розподілених обчислювальних системах. Сформульовано припущення про можливість використання обмеження на завантаження ресурсів в умовах вхідних потоків завдань, що мають високу інтенсивність, для поліпшення економічних показників роботи обчислювальних систем. В якості підходу запропонована модифікація методу планування на основі вирішення задачі про найменше покриття, що використовує перепланування в тих випадках, коли попередньо розраховані коефіцієнти використання ресурсів перевищують задані порогові значення. Для компенсації зменшення коефіцієнта використання ресурсів пропонується метод вибору ресурсів, що базується на статистичному аналізі часу рішення завдань на ресурсах системи.

Ключові слова: розподілена обчислювальна система, ресурс, завдання про найменше покриття, коефіцієнт використання, час відповіді.

METHOD OF BATCH SCHEDULING OF THE TASKS WITH HIGH INTENSITY AND ALLOCATING OF RESOURCES IN A DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS

S.V. Minukhin

The methods of the batch scheduling tasks in distributed computing systems. Formulate hypotheses about the possibility of the using of restrictions of the resource utilization when in the input job stream have a high intensity to improve the economic performance of computing systems. As the approach proposed modification of the scheduling on the basis of solving the problem of the minimal cover, use a rescheduling in cases when the pre-calculated resource utilization exceeds a predetermined threshold. To compensate for the decrease in the utilization of resources proposed a selection method based on a statistical analysis of time running of the tasks on resources of system.

Keywords: distributed computing system, resource, minimal cover, utilization, response time.