

Разработка дерева сценариев исследования и анализа результатов процедуры планирования для гетерогенной распределённой системы

С.В. Минухин, С.В. Знахур

Харьковский национальный экономический университет, 9-А, пр. Ленина, Харьков, Украина

ms_vl@mail.ru, sergznakhur@mail.ru

Аннотация. В работе исследуется подход к организации эксперимента для исследования и анализа планирования заданий и ресурсов гетерогенной распределённой системы на основе алгоритмов метода покрытия и алгоритма FCFS. Рассмотрены основные положения подхода, проведен сравнительный анализ эффективности FCFS, эвристических и точного алгоритмов решения задачи о покрытии для решения задач планирования. Приведены результаты компьютерных экспериментов и анализ в соответствии с разработанным сценарием моделирования и анализа, использующего представление в виде дерева. Проведенный анализ обосновывает преимущества предлагаемых алгоритмов в условиях динамики изменения параметров инфраструктуры гетерогенной распределённой системы, системы планирования и заданий.

Ключевые слова

Алгоритм, наименьшее покрытие, жадный алгоритм, гетерогенная распределенная система, планирование, FCFS, периодичность, сценарий, дерево, эксперимент

1 Введение

Одним из направлений развития современных информационно-коммуникационных технологий является организация распределённых вычислительных систем, совместно использующих ресурсы различных организаций. Это направление предполагает реализацию идеи распределённого метакомпьютинга – создание высокопроизводительных кластеров, позволяющих решать разнообразие задачи в таких сферах как физика высоких энергий, молекулярная биология, решения разряженных систем линейных уравнений большой размерности и т.д., основной особенностью которых является потребность в значительном количестве свободных и доступных в требуемые промежутки времени ресурсов.

Система управления такими системами предполагает наличие одновременно двух механизмов для ее реализации – механизма планирования заданий и механизма планирования распределения ресурсов между заданиями. Отметим, что в литературе эти понятия различаются следующим образом: под планированием заданий и распределением ресурсов понимают нахождение такого соответствия задания – ресурсы (matching), которое отражает требования пользователей к реализации запроса на выполнение задания (QoS) и позволяет максимизировать критерий пользовательской удовлетворённости.

С другой стороны, эффективность работы распределённой системы характеризуется ее системной производительностью, которая определяется уровнем использования имеющихся ресурсов и определяется на основе коэффициента использования ресурсов. Таким образом, эти механизмы должны не только взаимодействовать между собой, но и обеспечивать при этом требуемый уровень эффективности работы распределенной системы в целом.

Существующая на настоящий момент времени классификация методов планирования заданий включает статический и динамический режимы. В динамическом режиме задания поступают в обработку непосредственно после их представления для решения при помощи системы представления заданий (submission system), при этом используются пакетный (batch mode) или одиночный (immediately) режимы.

В пакетном режиме задания формируются в так называемые пакеты (metatask, Bag of Tasks) в определенные промежутки времени, называемые интервалом (временем) планирования (scheduling interval) или событием назначения (mapping event). При этом требуется выбрать один из следующих методов определения времени планирования: использовать априори задаваемую величину периодичности планирования (промежутка

времени между двумя последовательными событиями назначения) или решать задачу планирования в момент времени, когда пакет заданий достигнет априори задаваемого размера. В обоих случаях необходимо использовать информацию о следующих характеристиках распределенной среды – интенсивность потока поступающих в систему заданий, их гетерогенность, количество и производительность используемых ресурсов, ожидаемое время выполнения заданий на различных ресурсах и ряд других.

Для оценки эффективности работы системы используются следующие метрики: *makespan* (время выполнения – время завершения выполнения самого последнего задания в системе), *flowtime* (*response time*) – время ответа системы или время выполнения всех заданий, поступивших в обработку в момент времени планирования, и коэффициент использования, отражающий системную производительность (*system performance*) – характеризует уровень использования (загрузки) ресурсов с учетом спланированных на этот ресурс заданий за время планирования всех заданий глобальной очереди.

Выбор ресурсов осуществляется при этом на основе эвристик, для каждого задания определяется (назначается) только один ресурс и в случае, например, невысокой (низкой или средней) гетерогенности кластера возникает конкуренция, которая приводит к необходимости разработки других эвристик, позволяющих устранить этот недостаток.

В данной работе развивается подход, предложенный и исследованный в работе [1]. В соответствии с рассмотренными методами планирования заданий и планирования распределения ресурсов он базируется на пакетном режиме планирования заданий, и пакетном методе распределения ресурсов, для выбора которых используется задача о наименьшем покрытии.

Целью данной работы является разработка и анализ результатов плана (дерева) экспериментов для имитационного моделирования работы инфраструктуры гетерогенной распределенной вычислительной системы и планировщика, использующего различные алгоритмы решения задачи о покрытии – MC – и FCFS. Анализ влияния изменения параметров имитационной модели на значения показателей производительности работы гетерогенной распределенной системы осуществляется на основе метрик: время выполнения всех заданий и коэффициент использования ресурсов [1].

Предлагаемая в работе система планирования базируется на следующих положениях.

1. Система планирования организована в виде двухуровневой структуры, на первом уровне которой из глобальной очереди выбирается множество заданий (пакет заданий, называемый в данной модели *пулом*), подлежащие планированию, к ним применяется метод решения задачи о наименьшем покрытии. Далее выбранные, как результат ее решения, задания назначаются на доступные и свободные на момент планирования ресурсы и решаются на них под управлением локального планировщика.

2. Метод планирования на каждом шаге планирования максимально загружает *минимальное количество* свободных и доступных на момент планирования ресурсов. На следующем этапе распределения заданий очереди количество ресурсов для возможного назначения на них заданий будет максимальным.

3. Алгоритм решения задачи о наименьшем покрытии должен иметь малую временную сложность его реализации для минимизации времени, отводимого на процесс планирования заданий для их выполнения на ресурсах.

4. Система планирования использует *пакетную технологию*: задания, организованные в форме пакета (пула) заданий, выбираются из глобальной очереди, и по мере их планирования на ресурсы помещаются в пакет заданий на назначенный ресурс (ресурсы) и передаются на решение на этот ресурс (ресурсы).

5. Система планирования предусматривает использование идеи балансировки загрузки ресурсов: в случае, если ресурс, вошедший в покрытие на момент распределения на него задания (заданий) занят, оно перепланируется на другой, но свободный на данный момент ресурс, также вошедший в покрытие или на который в настоящий момент имеется очередь с меньшим количеством заданий в пакете (без повторного решения задачи о покрытии).

2 Постановка компьютерных экспериментов и обоснование дерева сценариев

В качестве единицы времени планирования и проводимых расчетов в исследовании используется внутреннее время имитационной модели системы – 1 такт, которое соответствует времени решения одного задания, имеющего сложность 100 000 MI (million instructions), на ресурсе, производительность которого 100 000 MIPS (million instructions per second). Для генерации различных вариантов инфраструктуры и входных потоков заданий распределенной системы используются значения настроечных параметров имитационной модели, приведенные в табл. 1.

При проведении вычислительных экспериментов использованы следующие параметры:

сложность задания: задания малой сложности (трудоемкости) определялись значением их математическим ожиданием (МО) в интервале от 10 до 100 тактов; высокой сложности – от 10 000 и выше тактов. Сложность заданий определяется нормальным законом со среднеквадратическим отклонением (СКО) равным 10 % от МО;

производительность ресурсов: для генерации данных по производительности используется нормальный закон с $MO=10$ и $SKO = 1$;
 размер пула: выбирается в диапазоне от 50 до 1000 в зависимости от плана эксперимента;
 размер пакета заданий – 1;
 периодичность планирования: выбиралась в диапазоне от 1 до величины, соответствующей среднему времени освобождения ресурса;
 интенсивность поступления заданий: генерировалась по нормальному закону с MO равным 100, $SKO = 20$.
 Для проведения исследования и сравнительного анализа результатов планирования были выбраны следующие алгоритмы решения задачи о покрытии: точный алгоритм на основе рангового подхода [3], жадный алгоритм [2], и алгоритм МС с малой временной сложностью и низкой погрешностью [4]. План эксперимента приведен в виде дерева на рис. 1.

Табл. 1. Параметры настроек динамической модели планирования

<i>№ n/ n</i>	<i>Параметр</i>	<i>Описание</i>	<i>Закон распределения, диапазон значений</i>
1	Интенсивность	количество заданий, которое будут подано на вход модели для решения	Нормальный. $MO = 100$, $SKO - 20$
2	Количество ресурсов	количество всех ресурсов, которыми решаются задания	От 10 до 300
3	Сложность решения задания	максимальное количество тактов, за которое будет решено задание	Нормальный. Малая сложность $MO1=100$ тактов, Большая сложность $MO2=100000$ тактов. Малая дисперсия – $SKO 10\%$ от MO , Большая дисперсия – $SKO 50\%$ от MO
4	Универсальность задания	количество ресурсов, которыми может быть решено задание, в процентах к общему количеству ресурсов промежуточного временной стек системы	50 %
5	Пул заданий	определенного размера, в который загружаются входящие задания	От 100 до 1000
6	Производительность ресурса	максимальное количество тактов решения задания, которое ресурс может выполнить за единицу времени	Нормальный. $MO=10$, $SKO - 1$
7	Пакет заданий	количество заданий, которое может «выстроиться» в очередь на выбранный ресурс после планирования	1
8	Коммуникационная задержка	количество тактов, которое характеризует временную задержку передачи задания на выбранный для ее решения ресурс	Постоянная – 10 тактов
9	Периодичность планирования	количество тактов, через которое осуществляется процедура планирования для заданий, поступивших в пул	От 1 до значения среднего времени освобождения ресурса

Предварительные исследования показали, что определенные комбинации значений параметров приводят к одинаковым результатам и закономерностям планирования. Имеет смысл говорить о паттернах изменения результатов планирования в зависимости от совместного изменения параметров модели (характеристик описания инфраструктуры распределенной системы, системы планирования и заданий). Поэтому в работе в качестве результатов дерева экспериментов приведены ключевые диаграммы листов дерева, показывающие особенности результатов планирования для выбранных алгоритмов (точного, жадного, МС и FCFS) при выборе установленных опытным путем отношений значений параметров имитационной модели.

Ключевым параметром (узлом) дерева является сложность задания, которая характеризуется законом распределения, средним значением и SKO . Для нормализации (сопоставления) значений данного параметра для разных экспериментов исследования предлагается использовать относительную величину сложности задания – отношение среднего значения ее сложности к средней производительности ресурса, что справедливо только при условии решения задания на одном ресурсе. Использование показателя относительной величины сложности позволило получить устойчивые паттерны для разных вариантов соотношений сложности заданий и производительности ресурсов. В работе приведены паттерны малой относительной сложности (до 10) и большой относительной сложности (до 10000). Эксперименты показали, что существенное влияние на результаты и стратегию планирования оказывает дисперсия сложности задания, для удобства отображения результатов малой дисперсией сложности заданий была выбрана дисперсия с SKO меньше 10% относительно MO , большая дисперсия – с SKO более 30 % относительно MO . Поэтому вторым уровнем для узлов дерева является выбор значения дисперсии сложности заданий - дисперсия малая или большая.

Третьим уровнем для узлов дерева является условие, определяющее размер пула относительно величины интенсивности поступающих в систему заданий и количества ресурсов. Данное условие позволяет исследовать

устойчивость результатов планирования применительно к изменению размерности матрицы соответствия заданий/ресурсам M , в которой: m – количество заданий пула, подлежащих планированию; n – количество ресурсов системы, свободных на момент планирования. В работе [4] показано, что размерность матрицы соответствия определяет время планирования и влияет на эффективность алгоритмов планирования.

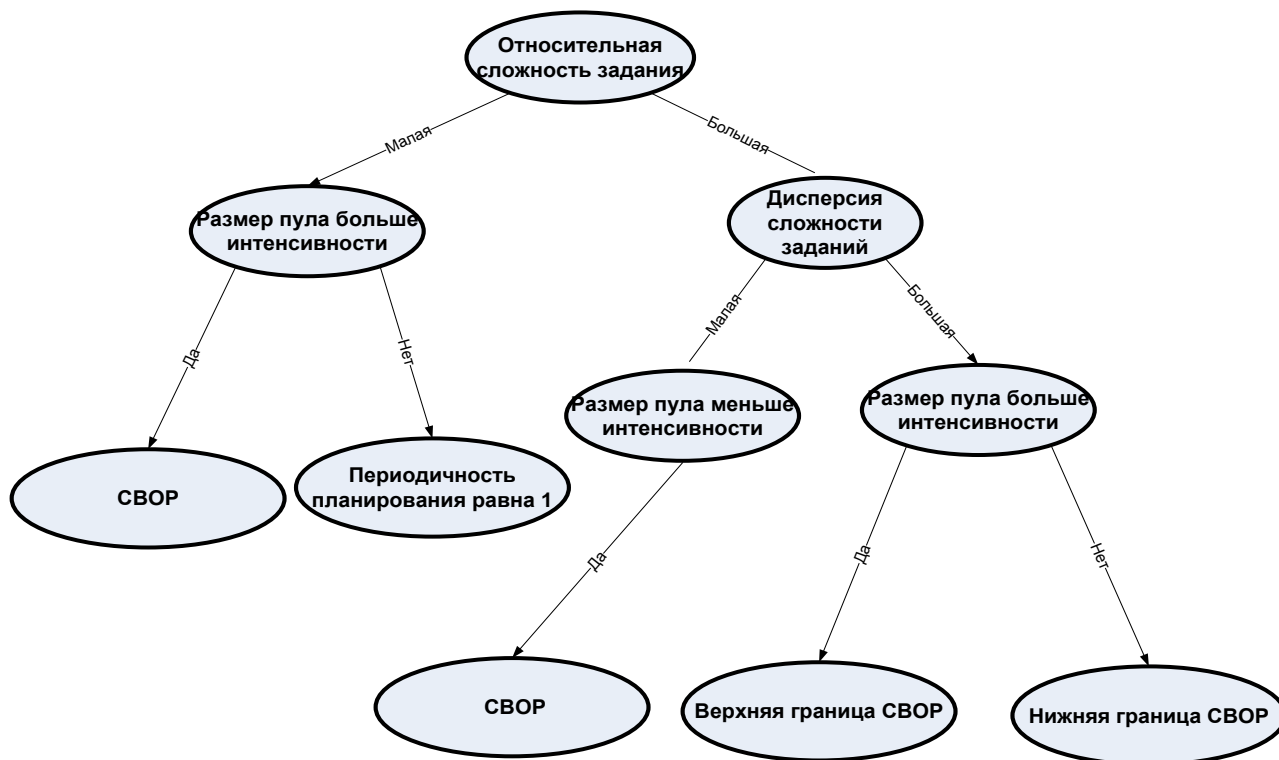


Рис. 1. Дерево сценариев проведения эксперимента для исследования процедуры планирования

Четвертым уровнем для узлов дерева является лист дерева (диаграммы, показывающие результаты планирования при изменении периодичности планирования). Периодичность планирования выбирается равной единице (то есть планирование осуществляется на каждом такте работы системы) так и устанавливается равной среднему времени освобождения ресурса (СВОР), которое рассчитывается по формуле:

$$СВОР = \frac{\text{Средняя интенсивность заданий} * \text{средняя сложность задания}}{\text{Количество ресурсов} * \text{производительность ресурса} * \text{средняя универсальность задания}} \quad (1)$$

Периодичность планирования, равная одному такту имеет смысл для заданий малой относительной сложности. СВОР – является верхней границей планирования для заданий любой относительной сложности, нижняя граница может быть определена как на основе правила трех сигм относительно СВОР.

Для наглядности отображение результатов диаграммы построены для диапазонов изменения следующих показателей: количество ресурсов, размер пула и периодичность планирования.

Результаты первой ветки сценариев дерева (задания малой относительной сложности) приведены на рис. 2-4. Следует отметить, что результаты не содержат исследования по малой и большой дисперсии заданий малой относительной сложности (приведена только ветка малой дисперсии), что обусловлено близкими результатами и паттернами планирования для периодичности равной 1 такт (она является минимальной в имитационной модели).

На рис. 2 показаны значения среднего времени выполнения и коэффициента использования для заданий малой относительной сложности при периодичности планирования 1 такт и размере пула, который равен интенсивности (100) для количества ресурсов меньше интенсивности.

3 Анализ полученных результатов

Результаты на рис. 2 показывают, что до 20 ресурсов исследуемые на основе алгоритма МС алгоритмы имеют практически одинаковые значения времени выполнения коэффициента использования, далее – точный метод экспоненциально увеличивает время выполнения за счет увеличения времени планирования.

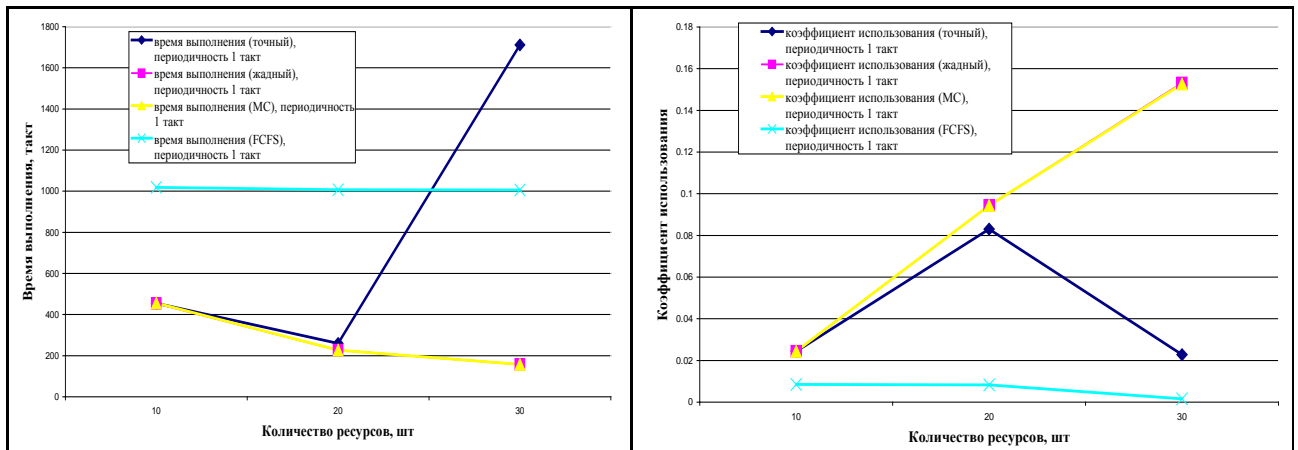


Рис. 2. Среднее время выполнения и коэффициент использования для заданий малой относительной сложности при периодичности планирования 1 такт и размере пула равным средней интенсивности (100) для количества ресурсов меньше средней интенсивности

На малом количестве ресурсов FCFS имеет худшие результаты, чем списочные алгоритмы: коэффициент использования (балансировки загрузки ресурсов) остается низким, в отличие от жадного и MC, которые улучшают балансировку загрузки ресурсов с увеличением количества ресурсов. Преимущества MC по отношению к жадному алгоритму на малом количестве ресурсов практически отсутствуют.

На рис. 3 показаны изменения среднего времени выполнения и коэффициента использования для заданий малой относительной сложности при периодичности планирования 1 такт и размере пула равным 100 (то есть, равного средней интенсивности заданий) для большого количества ресурсов. В связи с большой вычислительной сложностью и временем расчета для диапазона ресурсов 100–300 результаты по точному алгоритму не приводятся.

Результаты на рис. 3 показывают, что существенное улучшение результатов планирования у MC по отношению к жадному алгоритму наблюдаются на большом количестве ресурсов (начиная с 200) и в дальнейшем увеличивается полиномиально (квадратичный полином). Коэффициент использования ресурсов для FCFS практически равен 0, что свидетельствует о неравномерности загрузки ресурсов (как правило, загружаются только первые из списка ресурсы по алгоритму First Fit).

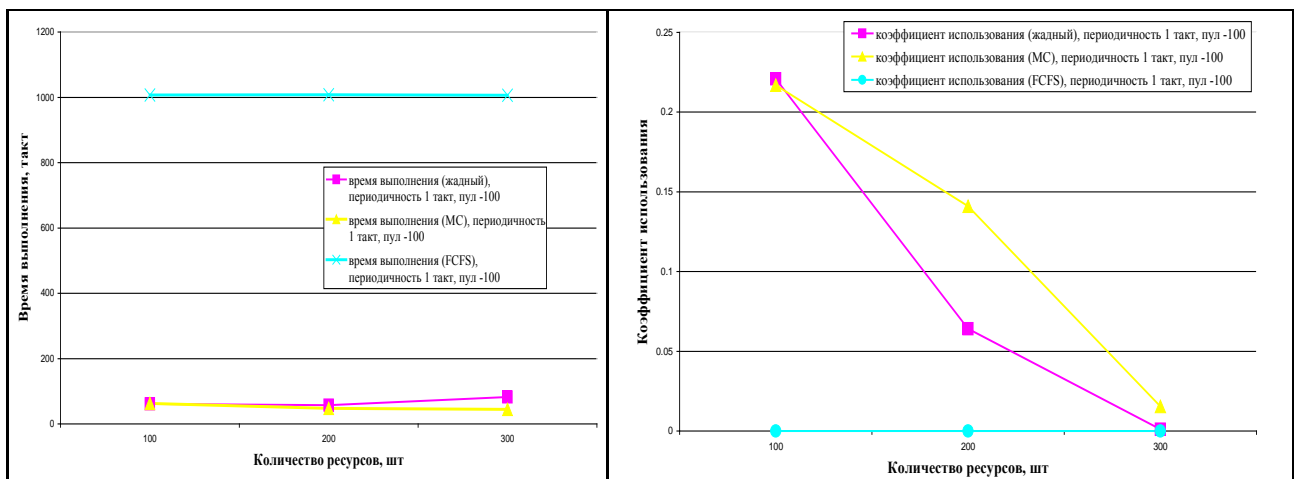


Рис. 3. Среднее время выполнения и коэффициент использования для заданий малой относительной сложности при периодичности планирования 1 такт, размере пула равном средней интенсивности для большого количества ресурсов (больше средней интенсивности 100)

Сравнительный анализ результатов планирования для заданий малой относительной сложности при периодичности планирования 1 такт в условиях изменения пула с 100 до 1000 для большого количества ресурсов приведен на рис. 4. Как показано на рис. 4, увеличение размера пула негативно влияет на результаты работы жадного алгоритма (пунктирная линия жадного алгоритма для размера пула 1000 существенно выше для времени выполнения по отношению к сплошной линии жадного алгоритма для размера пула 100). Следует

отметить, что увеличение пула приводит и к незначительному ухудшению балансировки загрузки ресурсов для МС для 100 ресурсов, но при увеличении количества ресурсов (после 200) это приводит к увеличению величины коэффициента использования.

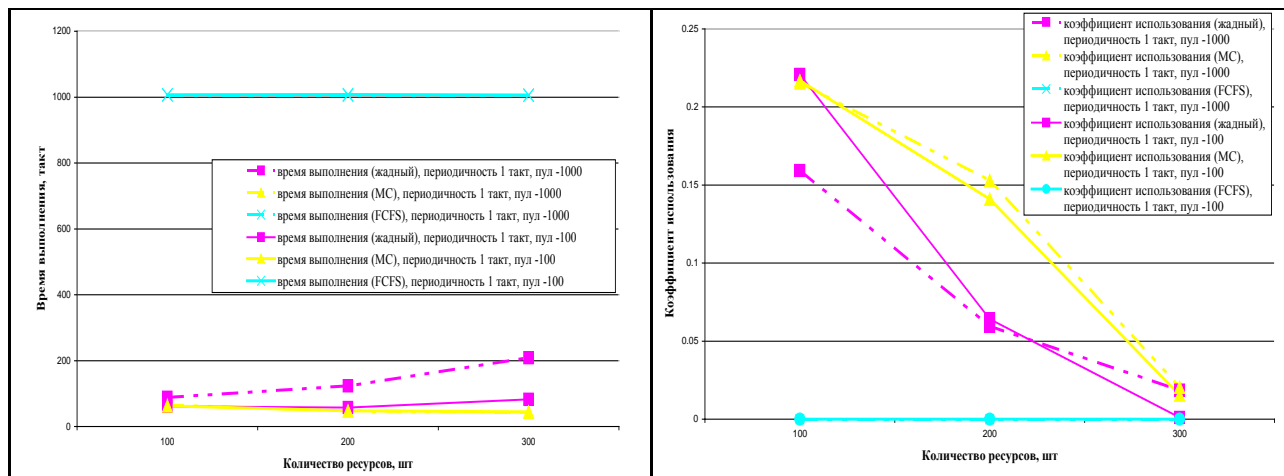


Рис. 4. Среднее время выполнения и коэффициент использования для заданий малой относительной сложности при периодичности планирования 1 такт, размеров пула 100 и 1000 для большого количества ресурсов (больше средней интенсивности 100)

Следующая ветка экспериментов показывает паттерны результатов планирования для заданий большой относительной сложности. На рис. 5–8 показаны результаты планирования для заданий большой относительной сложности и разного уровня СКО относительно МО при условии изменения количества ресурсов, размера пула и периодичности планирования. В исследовании для заданий большой относительной сложности, периодичность 500 тактов является нижней границей планирования, периодичность 1500 тактов – верхней (согласно результатам расчета СВОР).

Результаты для большой относительной сложности и большой дисперсии (СКО) сложности заданий (рис. 5) показывают, что списочные алгоритмы на малом количестве ресурсов дают одинаковые результаты по времени выполнения, что объясняется низкой погрешностью решения задачи о наименьшем покрытии для МС и приемлемой погрешностью жадного алгоритма по отношению к точному. Однако, балансировка загрузки ресурсов у точного хуже, чем у МС и жадного, что объясняется использованием у них дополнительных эвристик при выборе ресурса для назначения заданий (приоритет – производительность).

Увеличение времени планирования (с 500 тактов до 1500) для заданий большой относительной сложности и дисперсии существенно ухудшает результаты планирования для всех списочных алгоритмов для малого количества ресурсов – 10, однако на 30 ресурсах результаты времени выполнения практически совпадают.

Следует отметить, что балансировка загрузки ресурсов у точного метода, жадного и МС существенно снижается при увеличении периодичности планирования с нижней границы (500 тактов – 3 сигмы относительно МО СВОР) до верхней допустимой границы 1500 (равной МО СВОР).

Сценарий использования малой дисперсии для заданий большой сложности при периодичности планирования 500 тактов, размере пула 50, для количества ресурсов меньше интенсивности (100) приведен на рис. 7. Уменьшение дисперсии (СКО) не изменяет паттерн закономерности поведения алгоритмов, однако время выполнения для всех алгоритмов на 10 % больше, чем при большой дисперсии. Следует отметить, что увеличение количества ресурсов приводит к увеличению коэффициента использования не только для списочных алгоритмов, но и для FCFS.

На рис. 8 показано, что увеличение размера пула ухудшает результаты планирования для заданий большой относительной сложности и малой дисперсии (это характерно и для большой дисперсии сложности). На диаграмме показано увеличение времени выполнения для графиков с пунктиром (пул 150) относительно графиков с сплошной линией (пул 50). Следует отметить, что при наличии большой интенсивности для заданий большой сложности, результаты FCFS совпадают с результатами точного алгоритма, жадного и МС.

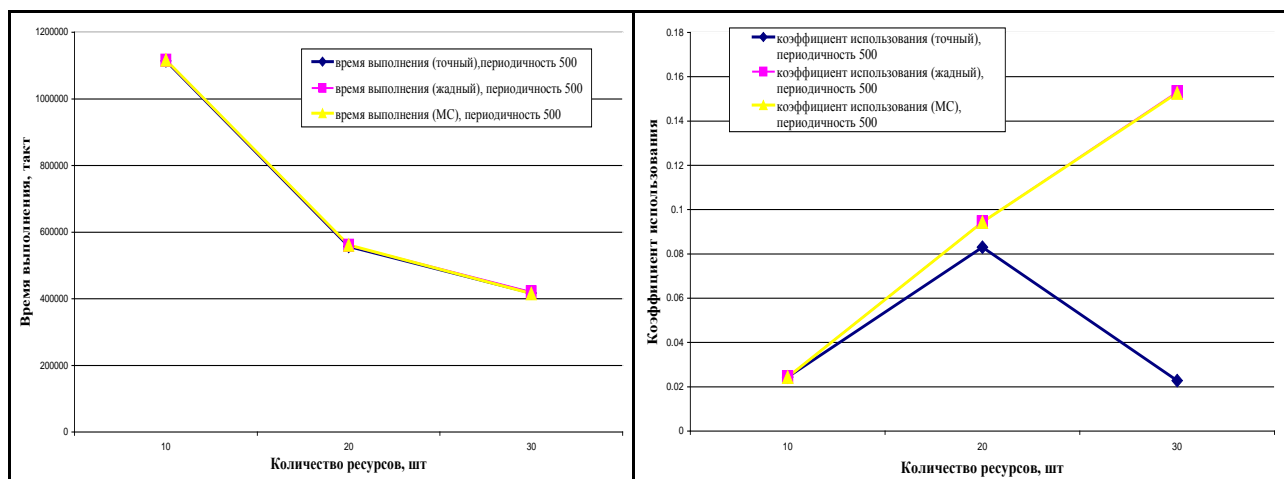


Рис. 5. Среднее время выполнения и коэффициент использования для заданий большой относительной сложности для периодичности планирования 500 тактов, размере пула 100 для количества ресурсов меньше средней интенсивности

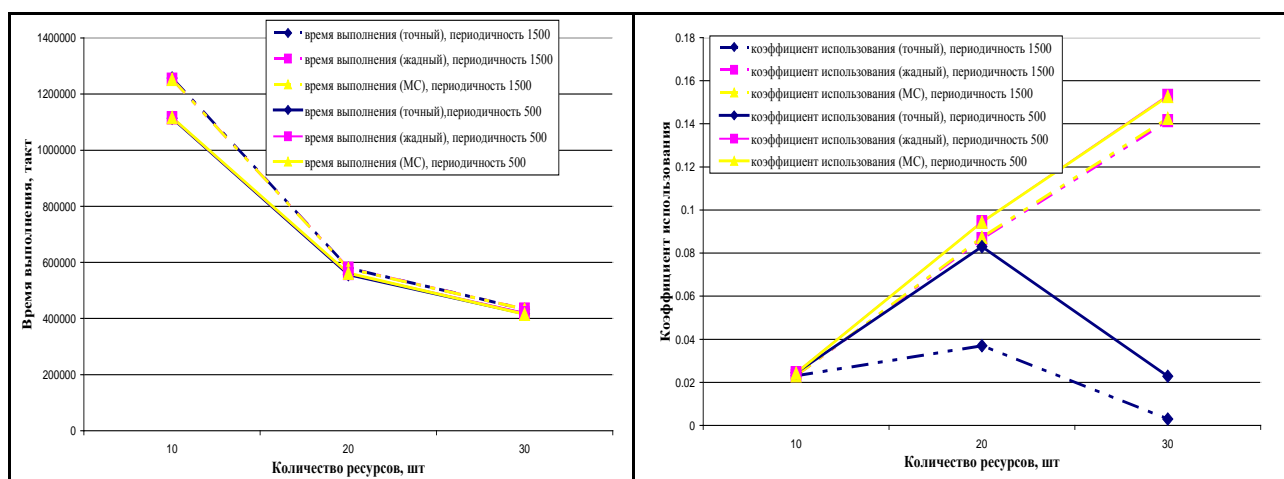


Рис. 6. Среднее время выполнения и коэффициент использования для заданий большой сложности при периодичности планирования 500 и 1500 тактов, размере пула 100, для количества ресурсов меньше средней интенсивности

Таким образом, проведен детальный план экспериментов, который покрывает основные паттерны взаимных соотношений параметров инфраструктуры, характеристик заданий и компонент системы планирования – размера пула, размера пакета заданий на ресурсы, периодичности планирования. Исследования показали особенности эвристических алгоритмов на основе алгоритма MC при экстремальных значениях относительной сложности, интенсивности по отношению к количеству ресурсов для нормального закона поступления заданий в систему.

4 Выводы

1. Сложные многопараметрические системы необходимо исследовать в рамках детального плана экспериментов. Однако количество параметров и их взаимное соотношение не позволяет реализовать подобный план оперативно. В работе предлагается заменить параметры относительными индикаторами (соотношениями параметров), а также строить бинарные деревья для описания сценария, в которых узлами являются условия (правила выбора ветки относительно значений индикатора). Приоритетность индикаторов определяется логикой исследования (в работе в качестве корневого узла дерева выбрана относительная сложность задания).

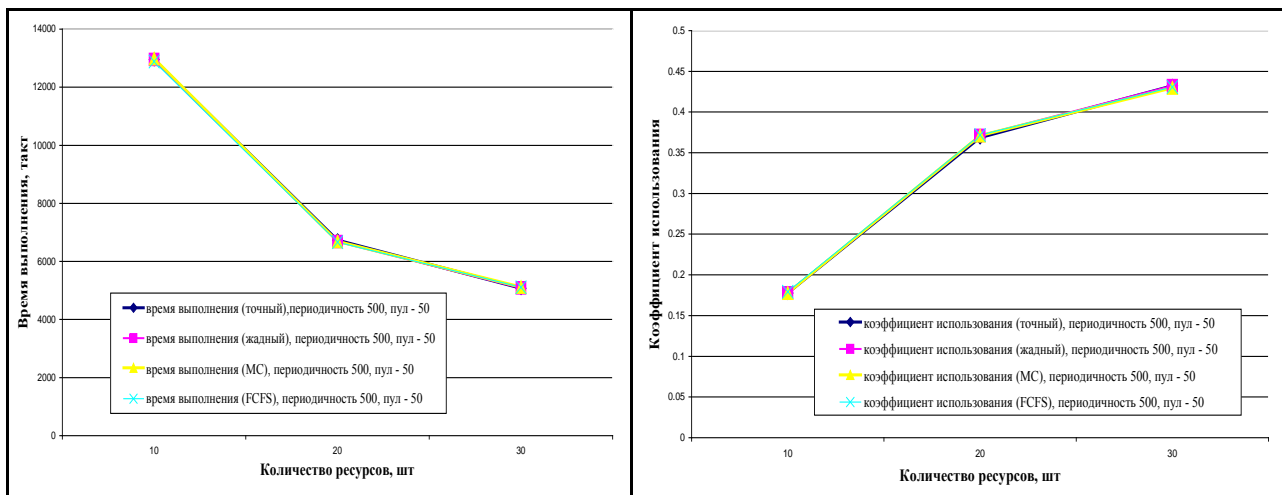


Рис. 7. Среднее время выполнения и коэффициент использования для заданий большой относительной сложности при периодичности планирования 500 тактов, размере пула 50, для количества ресурсов меньше интенсивности

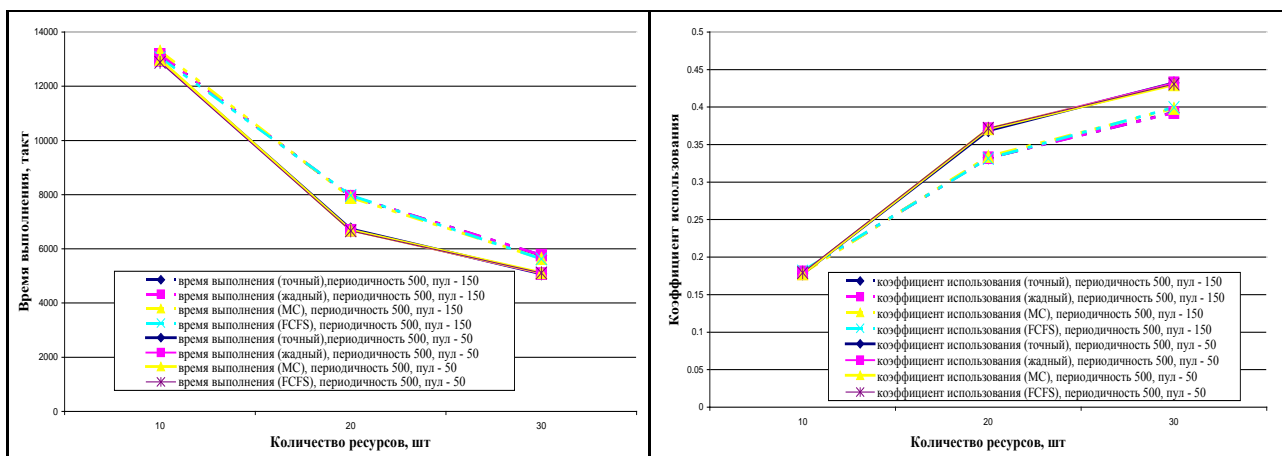


Рис. 8. Среднее время выполнения и коэффициент использования для заданий большой относительной сложности при периодичности планирования 500 тактов, размере пула 50 и 150, для количества ресурсов меньше средней интенсивности

2. Результаты показали, что задания малой относительной сложности и большой относительной сложности должны иметь разные стратегии планирования, что определяет выбор алгоритма, периодичность планирования и размер пула. Для заданий малой относительной сложности при большом количестве ресурсов рекомендуется выбрать эвристический алгоритм MC, при малом количестве ресурсов (меньшей интенсивности) возможен выбор между жадным алгоритмом и MC. Для заданий большой относительной сложности выбор алгоритма не принципиален, если сложность имеет малую дисперсию (СКО в пределах до 10% относительно МО сложности).

3. Выбор периодичности планирования является ключевой задачей, оптимизирующей результаты использования эвристических алгоритмов на базе метода MC. В случае заданий малой относительной сложности рекомендуется использовать минимальную периодичность планирования, которая равна времени решения задачи о покрытии (определяется временной сложностью решения задачи планирования заданий на ресурсы). Для заданий большой относительной сложности рекомендуется использовать среднее время освобождения ресурса (СВОР) и определять нижнюю и верхнюю границу планирования относительно этого показателя на основе правила трех сигм. При этом в качестве аналитического выражения периодичности следует использовать формулы для распределения отношения двух случайных нормально величин, что является одной из задач дальнейших исследований.

Литература

- [1] С.В. Листровой, С.В. Минухин. Модель и подход к планированию распределения ресурсов в гетерогенных Грид-системах // *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики»*. – 2012. – № 5. – С. 120–133.
- [2] V. Chvátal. A greedy-heuristic for the set covering problem // *Math. Oper. Res.* – 1979. – № 4. – p. 233–235.
- [3] С.В. Листровой, А.Ю. Гуль, Е.С. Листровая. Точный алгоритм решения задачи о минимальном покрытии. // *Сборник научн. трудов. Информатика. Вып. 5.* – Киев; Наукова думка, 1998. – С. 32–36.
- [4] С.В. Листровой, С.В. Минухин. Метод решения задач о минимальном вершинном покрытии в произвольном графе и задачи о наименьшем покрытии // *Электронное моделирование*. – 2012. – Т. 34. – № 1. – С. 29 – 43.